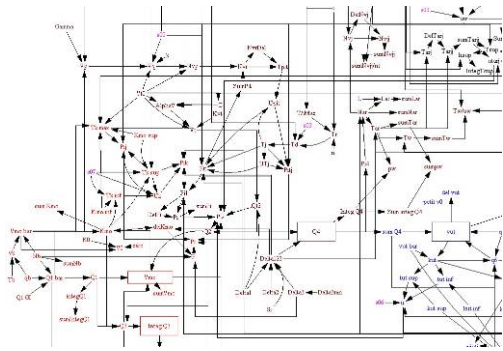




## Risque environnemental lié au recyclage

# BILAN ENTRE LA PRODUCTION D'EFFLUENTS D'ELEVAGE ET LEUR UTILISATION POTENTIELLE POUR FERTILISER LES CULTURES

# CAS DU PETIT TAMPON-GRAND TAMPON LA REUNION



Jean-Michel Médoc

Pôle Agriculture Durable, Environnement et Forêts – PADEF

Rapport technique  
Octobre 2006

© CIRAD – 2006

Photos de couverture : T. Raimbault et J.-M. Médoc

Vache allaitante posant dans une roue de tracteur dans le Sud de la Réunion

Extrait de l'interface d'un modèle de simulation développé par notre équipe

Champ de canne à sucre du Sud de la Réunion

## REMERCIEMENTS

Je suis très reconnaissant envers les éleveurs et les techniciens du développement (Bruno Delaburthe, Jacques Lepetit, Emmanuel Legendre, Vladimir Barbet-Massin, Eric Ferrère, Bruno Langlade et Vincent Delaunay) pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail et leur disponibilité et appui sur le terrain.

Je remercie également les collègues du Cirad ainsi que Thierry Raimbault (stagiaire) et Bruce Ayache (VCAT) qui se sont impliqués dans ce travail.

---

## SOMMAIRE

---

<b>I- INTRODUCTION.....</b>	<b>6</b>
<b>I-1. LA NECESSITE D'UN BILAN DES NUTRIMENTS ISSUS DES EFFLUENTS D'ELEVAGE</b>	<b>6</b>
<b>I-2. UNE APPROCHE GLOBALE .....</b>	<b>6</b>
<b>I-3. ORGANISATION DU DOCUMENT .....</b>	<b>6</b>
<b>II- MATERIELS ET METHODES .....</b>	<b>7</b>
<b>II-1. ZONE D'ETUDE « PETIT TAMPON – GRAND TAMPON ».....</b>	<b>7</b>
<b>II-2. DEMARCHE MISE EN ŒUVRE .....</b>	<b>9</b>
<b>II-3. ESTIMATION DE LA PRODUCTION D'EFFLUENTS ET DES ELEMENTS N, P ET K MAITRISABLES DU PETIT-GRAND TAMPON ET LEUR UTILISATION POTENTIELLE ....</b>	<b>11</b>
II-3-1. ESTIMATION DES REJETS DES ELEVAGES DE PORCS.....	13
II-3-2. ESTIMATION DES REJETS DES ELEVAGES DE VOLAILLES.....	14
II-3-3. ESTIMATION DES REJETS DES ELEVAGES BOVINS.....	14
II-3-4. DEFINITION ET CLASSEMENT DES EFFLUENTS SELON LEURS PROPRIETES AGRONOMIQUES.....	15
II-3-5. REGLES D'ATTRIBUTION DES EFFLUENTS AUX CULTURES .....	15
<b>II-4. BESOINS DES CULTURES .....</b>	<b>15</b>
II-4-1. PRINCIPE DE LA FERTILISATION RAISONNEE.....	15
II-4-2. BESOIN TOTAL DES CULTURES EN AZOTE $N_f$ .....	17
II-4-3. AZOTE FOURNI PAR LE SOL $N_0$ .....	18
II-4-4. COEFFICIENT APPARENT D'UTILISATION : CAU .....	22
<b>II-5. AZOTE APPORTE PAR LES FERTILISANTS ENGRAIS MINERAL ET EFFLUENTS D'ELEVAGE .....</b>	<b>22</b>
II-5-1. COEFFICIENTS D'EQUIVALENCE DES EFFLUENTS A L'ENGRAIS MINERAL : CEA	22
<b>II-6. BESOINS DES CULTURES ADAPTES EN FONCTION DE LA REGLEMENTATION RELATIVE A L'EPANDAGE .....</b>	<b>24</b>
<b>II-7. CALCUL DU BILAN AU NIVEAU DE LA ZONE D'ETUDE .....</b>	<b>25</b>
II-7-1. L'OUTIL DE CALCUL DES BESOINS DES CULTURES EN FERTILISANT ET DU BILAN : FERTILMO .....	25
II-7-2. SCENARIOS DE CALCUL DES BESOINS DES CULTURES .....	26
<b>III- RESULTATS .....</b>	<b>29</b>
<b>III-1. ESTIMATION DU STOCK DE NUTRIMENTS PRODUITS PAR LES EFFLUENTS D'ELEVAGE DANS LA ZONE DU PETIT TAMPON-GRAND TAMPON .....</b>	<b>29</b>
<b>III-2. SURFACES POTENTIELLEMENT EPANDABLES .....</b>	<b>30</b>
<b>III-3. BESOINS DES CULTURES.....</b>	<b>33</b>
<b>III-4. BILANS EN EFFLUENTS D'ELEVAGE .....</b>	<b>34</b>
<b>III-5. ENTRETIENS AVEC LES AGRICULTEURS EN VUE DE L'UTILISATION DES MODELES DE SIMULATION.....</b>	<b>35</b>
<b>IV- DISCUSSION .....</b>	<b>38</b>

<b>V- CONCLUSION ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>39</b>
<b>VI- BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>40</b>
<b>VII- LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>42</b>
<b>VIII- LISTE DES TABLEAUX .....</b>	<b>43</b>
<b>IX- ANNEXES .....</b>	<b>44</b>
<b>IX-1. METHODE D'INTERPOLATION INVERSE DISTANCE WEIGHTING (IDW) .....</b>	<b>44</b>
<b>IX-2. ESTIMATION DES REJETS DES ELEVAGES DE PORCS DE LA ZONE DU PETIT TAMPON-GRAND TAMPON .....</b>	<b>45</b>
<b>IX-3. ESTIMATION DES REJETS DES ELEVAGES DE VOLAILLES DE LA ZONE DU PETIT TAMPON-GRAND TAMPON .....</b>	<b>45</b>
<b>IX-4. ESTIMATION DES REJETS DES ELEVAGES BOVINS LAITIERS DE LA ZONE DU PETIT TAMPON-GRAND TAMPON .....</b>	<b>46</b>
<b>IX-5. ESTIMATION DES REJETS DES ELEVAGES BOVINS A L'ENGRAIS DE LA ZONE DU PETIT TAMPON-GRAND TAMPON .....</b>	<b>47</b>

---

## **I- INTRODUCTION**

---

### **I-1. La nécessité d'un bilan des nutriments issus des effluents d'élevage**

Le recyclage des effluents d'élevage en agriculture est une voie intéressante pour améliorer la durabilité des exploitations d'élevage dans la mesure où ce recyclage est basé sur le raisonnement agronomique de la fertilisation des cultures. A la Réunion, ces effluents représentent la source principale de matière organique et leur réutilisation est un véritable défi pour l'agriculture de l'île afin de réduire au minimum les risques de pollution de l'eau et des sols. Dans le sud de l'île, au Petit Tampon et Grand Tampon, on retrouve une production d'élevage importante et diversifiée (porcs, volaille, vaches laitières, bovins allaitants et à l'engrais) ainsi que des systèmes de culture eux aussi diversifiés (canne à sucre, cultures fruitières semi-pérennes, maraîchage, et prairies). A ce jour, aucun diagnostic agronomique n'a été effectué dans ce secteur et étant donnée cette situation diversifiée, il nous a semblé intéressant d'un point de vue agronomique mais aussi en terme de gestion intégrée d'évaluer l'adéquation entre l'offre en effluents d'élevage et les besoins des cultures en ces effluents.

### **I-2. Une approche globale**

L'objectif de cette étude est de réaliser un bilan des éléments nutritifs issus des effluents d'élevages pour la zone du Petit Tampon-Grand Tampon. Il s'agit à la fois d'acquérir une meilleure connaissance de la zone et d'éclairer les acteurs agricoles sur la situation de leur territoire en terme de production et d'utilisation d'effluents d'élevages. Si le bilan global est déficitaire alors il y a nécessité pour les agriculteurs d'importer les matières organiques ou des fertilisants de synthèse pour satisfaire les besoins de leurs cultures. Toutefois, on pourrait descendre à un niveau plus fin et voir si des difficultés se présentent au niveau des exploitations individuelles. Si le bilan global est excédentaire, des transferts de matières organiques, brutes ou transformées, devront être envisagés vers des zones déficitaires. Ce diagnostic correspond à la base agronomique et géographique pour envisager quantitativement de tels transferts [Leterme, 2003]. La finalité est, à l'issue de ce bilan, de proposer, en lien avec les acteurs agricoles, des solutions de gestion adaptées. On peut reconnaître que cet indicateur ne donne, dans un premier temps, qu'une vision globale et théorique, mais il permet d'envisager, dans un second temps, une meilleure gestion des nutriments, à condition d'être allé voir à l'échelle des exploitations individuelles.

### **I-3. Organisation du document**

Afin de satisfaire l'objectif fixé, nous décrivons, dans une première partie « matériels et méthodes » le contexte agricole de la zone Petit Tampon-Grand Tampon. et la méthodologie employée. La mise en place de cette méthode est fondamentale puisqu'elle constitue l'outil de diagnostic ; ce qui justifie la longueur de cette partie. Enfin, la seconde partie présente les résultats de cette étude associés aux premiers résultats des entretiens réalisés auprès des agriculteurs de la zone. Nous terminerons cette présentation par une discussion montrant notamment les limites de ce travail et les perspectives qu'il peut engendrer.

Ce travail a fait l'objet d'un stage de fin d'étude d'ingénieur [Raimbault, 2005] et d'une présentation de poster à un colloque international [Médoc et al, 2006].

## II- MATERIELS ET METHODES

### II-1. Zone d'étude « Petit Tampon – Grand Tampon »

La zone concernée par l'étude regroupe les localités du Petit Tampon et du Grand Tampon. Elle se situe sur la commune du Tampon, au sud de la Réunion (figures 1 et 2). Cette zone est localisée entre les latitudes 20°13'S et 20°16'S et les longitudes 55°31'E et 55°36'E. Elle présente une superficie de 2 800 ha et un dénivelé de 1 130 m, la partie la plus basse se situant à 550 m (route Hubert Delisle) et la plus haute à 1 680 m d'altitude (Notre Dame de la Paix). Ses limites sont constituées au nord par la rivière d'Abord, au sud par le Bras Leclerc, à l'ouest par la route Hubert Delisle et à l'est par la route de Notre Dame de la Paix. Ces limites géographiques confèrent à la zone d'étude une cohérence territoriale en lien avec la présence de barrières naturelles ou de zones urbanisées. Nous faisons l'hypothèse que les transferts de matières organiques se font à l'intérieur de ce territoire, en se basant sur des échanges prioritaires dus à la proximité des producteurs et des consommateurs de matières organiques.

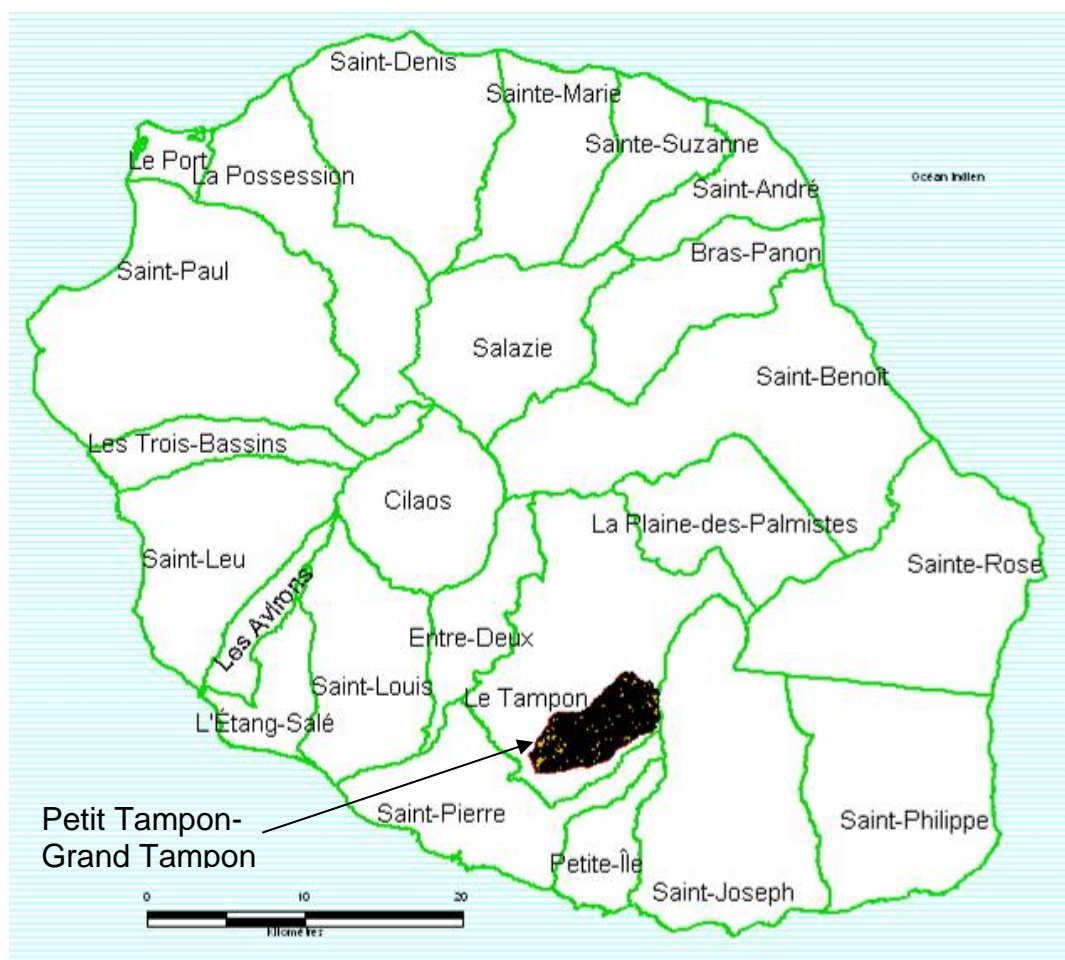
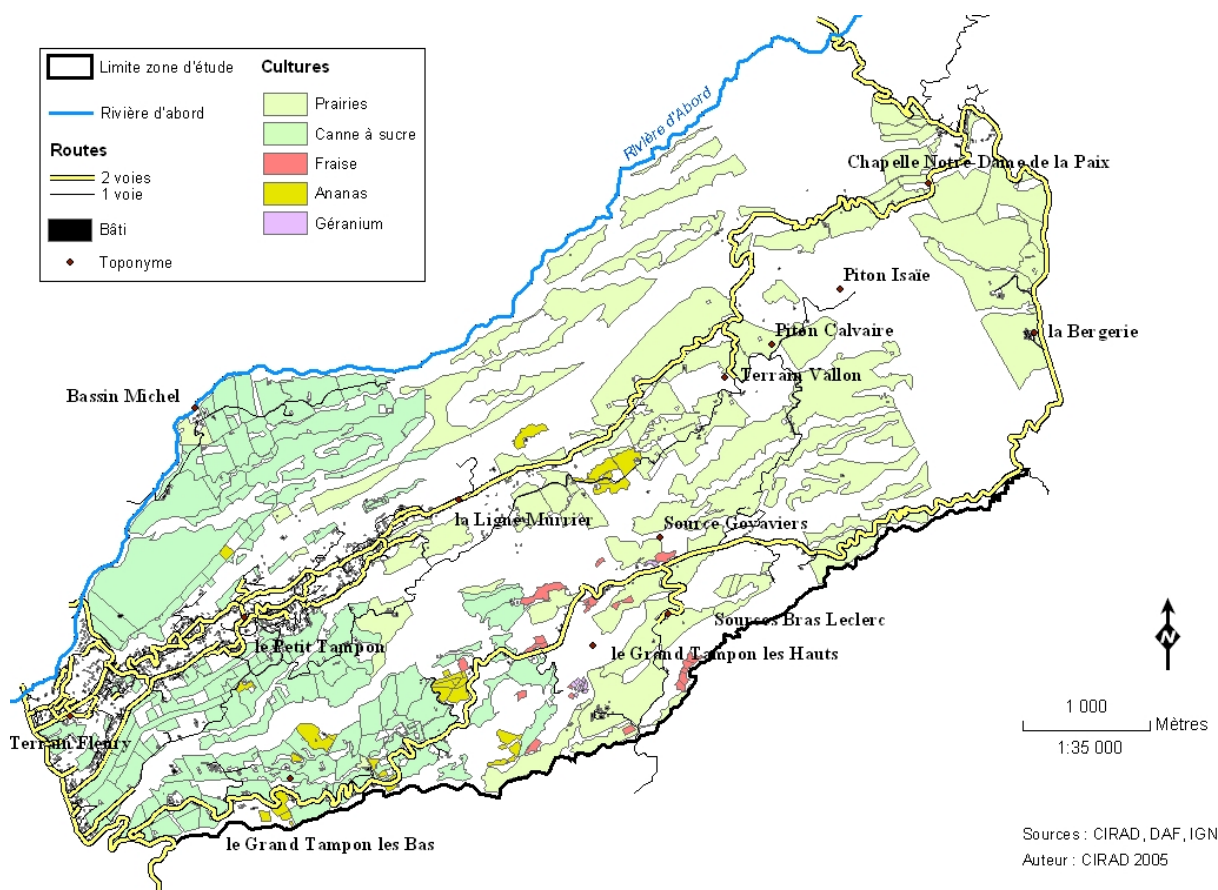


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude Petit Tampon-Grand Tampon



**Figure 2 : Carte générale de la zone du Petit Tampon-Grand Tampon et répartition des cultures**

D'après la typologie des systèmes de cultures réunionnais établie par Saint Macary et al. [2003], la zone d'étude du Petit-Grand Tampon correspond à une zone de « canne pluviale, pâturages et maraîchage ». En fait, on y retrouve à la fois une production d'élevage importante et diversifiée (porcs, volaille, vaches laitières, bovins allaitant et à l'engrais) associée à des systèmes de culture eux aussi diversifiés.

En ce qui concerne les cultures, la zone d'étude est divisée en deux parties :

- Une partie basse au sud-ouest mise en valeur par des cultures de canne à sucre ;
- Une partie haute au nord-est mise en valeur par des cultures fourragères en lien avec les élevages bovins.

A l'intérieur de ces deux parties, on trouve des cultures maraîchères (pommes de terre, haricots, carottes, fraises, chou chou, ...), semi-permanentes (ananas), fruitières (pêchers, agrumes), ainsi que du géranium.

Les espèces fourragères cultivées sur la zone d'étude sont des graminées tempérées (Dactyle, Ray-grass, Fétuque élevée, Brome cathartique, Flouve odorante, Houllque laineuse...), des graminées tropicales (Kikuyu, Chloris, Sétaria, Brachiaria, ...) et des cannes fourragères.

Les données des surfaces cultivées en canne à sucre et prairies sont issues des déclarations PAC 2004, traitées à la DDAF et numérisées dans MapInfo. Les îlots ou parcelles cultivés en ananas, fraises, géranium et vergers fruitiers (pêchers, agrumes) ont été localisés et numérisés dans MapInfo avec l'aide du technicien arboriculture/maraîchage de la Chambre d'Agriculture chargé de la zone.

Les cultures maraîchères, selon la Chambre d'agriculture, sont majoritairement composées de pomme de terre et de choux. Les surfaces dédiées à ces cultures n'ayant pu être définies avec précision sur la zone, sauf celles consacrées à la fraise, nous utilisons les



données du RA 2000 correspondant au deux sous-communes Petit Tampon et Grand Tampon, auxquelles nous appliquons un coefficient « correcteur » lié au rapport de la surface de la zone d'étude et des deux sous-communes. Ce coefficient est de 0,7 et son application est faite dans l'hypothèse où la répartition des cultures est homogène entre la zone d'étude et les deux sous-communes du RA 2000.

Le tableau 1 présente les surfaces des cultures identifiées sur la zone d'étude.

**Tableau 1 : Surfaces des cultures de la zone d'étude [DDAF, Chambre d'Agriculture]**

Type culture	Surfaces (ha)
Prairies	681
Canne à sucre	497
Ananas	32
Arboriculture	2
Fraises	11
Géraniums	2
Maraîchage	52

La somme des surfaces des cultures de la zone d'étude est égale à 1 277 ha (assimilée à la SAU). Les parcellaires canne à sucre et prairies représentent à eux deux plus de 90% de la SAU avec 1 179 ha.

## II-2. Démarche mise en œuvre

Les excédents de déjections animales par rapport aux surfaces d'épandage disponibles entraînent des risques environnementaux graves en Europe. Ils concernent, en particulier, la pollution des eaux par les nitrates ( $\text{NO}_3$ ) et les phosphates ( $\text{PO}_4$ ), la pollution de l'air par les émissions gazeuses d'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ), les gaz à effet de serre tels que le méthane et le protoxyde d'azote ( $\text{CH}_4$  et  $\text{N}_2\text{O}$ ), et la pollution des sols par les métaux lourds et le phosphore accumulé [Martinez et Le Bozec, 2000]. A ce jour, aucune pollution chronique grave due aux déjections animales n'a été constatée dans la zone.

Pour évaluer ces impacts potentiels, il est nécessaire de faire un diagnostic de la situation. Différentes approches peuvent être mises en œuvre :

- mesurer ou calculer à partir de données des indicateurs permettant d'évaluer un phénomène (*e.g.* évolution des teneurs en nitrates dans les nappes ou les eaux de surface) ;
- effectuer le bilan entrées/sorties des flux d'éléments potentiellement polluants dans différentes zones pour quantifier les excédents éventuels.

La bibliographie existante sur les bilans en éléments nutritifs est importante et relativement récente. Selon les situations, la FAO présente plusieurs approches et méthodes utilisées pour ces évaluations [Roy et al, 2005]. Cette synthèse est le résultat d'une conférence électronique lancée par la FAO en 2002 et 2003. On trouve donc des méthodes adaptées aux niveaux micro (parcelle, exploitation agricole), méso (régional, zone agroécologique), macro (national, continental, mondial). Ci-dessous quelques exemples de références :

- Micro : NUTMON (Nutrient Monitoring) ; suivi des éléments nutritifs dans les systèmes agricoles tropicaux permet d'analyser la durabilité financière et environnementale des systèmes [Smaling et Fresco, 1993] ;
- Méso : Méthode Stoorvogel et Smaling [1990], qui est basée sur l'évaluation de cinq flux entrants (fumier, engrais minéraux, déposition, fixation biologique et sédimentation) et cinq flux sortants (résidus de culture, produit récolté, lessivage, pertes gazeuses et érosion) ;

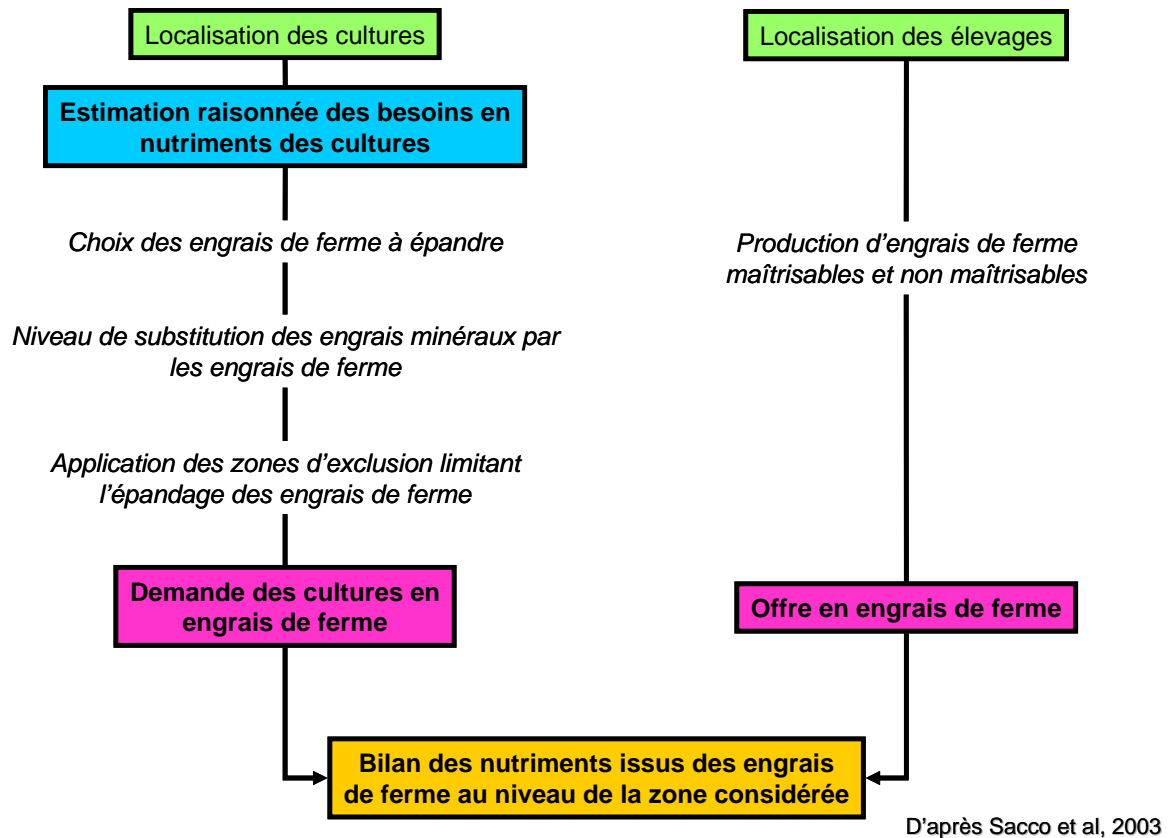
- Macro : méthode Stoorvogel et Smaling [1990], qui évalue l'état d'appauvrissement en éléments nutritifs du sol en Afrique subsaharienne ; approche IFDC (Centre international pour la fertilité des sols et le développement agricole) qui tire parti des travaux précédents en utilisant les caractéristiques des SIG conjointement avec les méthodes et procédures permettant d'estimer les bilans. Au niveau national, approche OCDE (Organisation de Coopération et de Développement Economique), qui développe un bilan de l'azote du sol en suivant une série d'indicateurs agro-environnementaux caractérisant les éléments principaux du cycle de l'azote.

Toutes ces approches sont basées sur des bilans effectués sur des périodes de temps courtes (saison, cycle culturaux, année) et dépendent de nombreuses hypothèses relatives à la dynamique des éléments nutritifs dans les sols, à leur efficacité d'utilisation par les plantes, etc. Aujourd'hui ces bilans sont considérés comme des indicateurs de durabilité des systèmes agricoles et sont utilisés pour concevoir des stratégies de gestion des éléments nutritifs.

Dans les régions d'agriculture intensive, des bilans régionaux d'éléments nutritifs sont réalisés. Les surplus ou déficits identifiés (fertilisation-prélèvements) sont utilisés comme indicateurs pour juger du risque de pollution lié aux pratiques. Ce type de bilans régionaux a été réalisé en Italie [Sacco et al, 2003] et en Asie du Sud-Est [Gerber et al, 2005] dans des zones de forte concentration d'élevages.

Aujourd'hui, compte tenu de la production d'élevage dans la zone du Petit Tampon-Grand Tampon, une telle référence paraît utile à une gestion appropriée des effluents d'élevage. Cependant, notre objectif est de comparer une production réelle d'effluents d'élevages avec des potentialités d'utilisation de ces effluents, qui sont du domaine de l'hypothétique. La connaissance des quantités d'engrais minéral réellement utilisées, notamment, n'est pas utile dans notre étude, alors qu'elle est déterminante dans les méthodes citées ci-dessus. Il a donc fallu mettre au point une méthode adaptée à la problématique et aux données disponibles.

Notre objectif a été de collecter, d'organiser et de combiner l'information géographique et agronomique dans le système d'information géographique MapInfo Professional 7.0 afin d'estimer un bilan des éléments NPK issus des effluents d'élevage sur la zone considérée (figure 3).



**Figure 3 : Démarche mise en œuvre**

Cette démarche à l'échelle d'une zone vise à intégrer au mieux la complexité liée à la production de différents effluents d'élevage, la concurrence qui peut y avoir entre eux et à la diversité des utilisations possibles sur les cultures en considérant de manière raisonnée les besoins en nutriments des cultures, les conditions agroclimatiques de la zone influençant le comportement des matières organiques dans le sol et la réglementation relative à l'épandage.

Les hypothèses retenues pour le calcul de ce bilan sont les suivantes :

- Zone n'exportant et ne recevant aucune matière organique ;
- Épandage potentiellement réalisable chez tous les agriculteurs disposant de parcelles cultivées ;
- L'année comme pas de temps de calcul.

### II-3. Estimation de la production d'effluents et des éléments N, P et K maîtrisables du Petit-Grand Tampon et leur utilisation potentielle

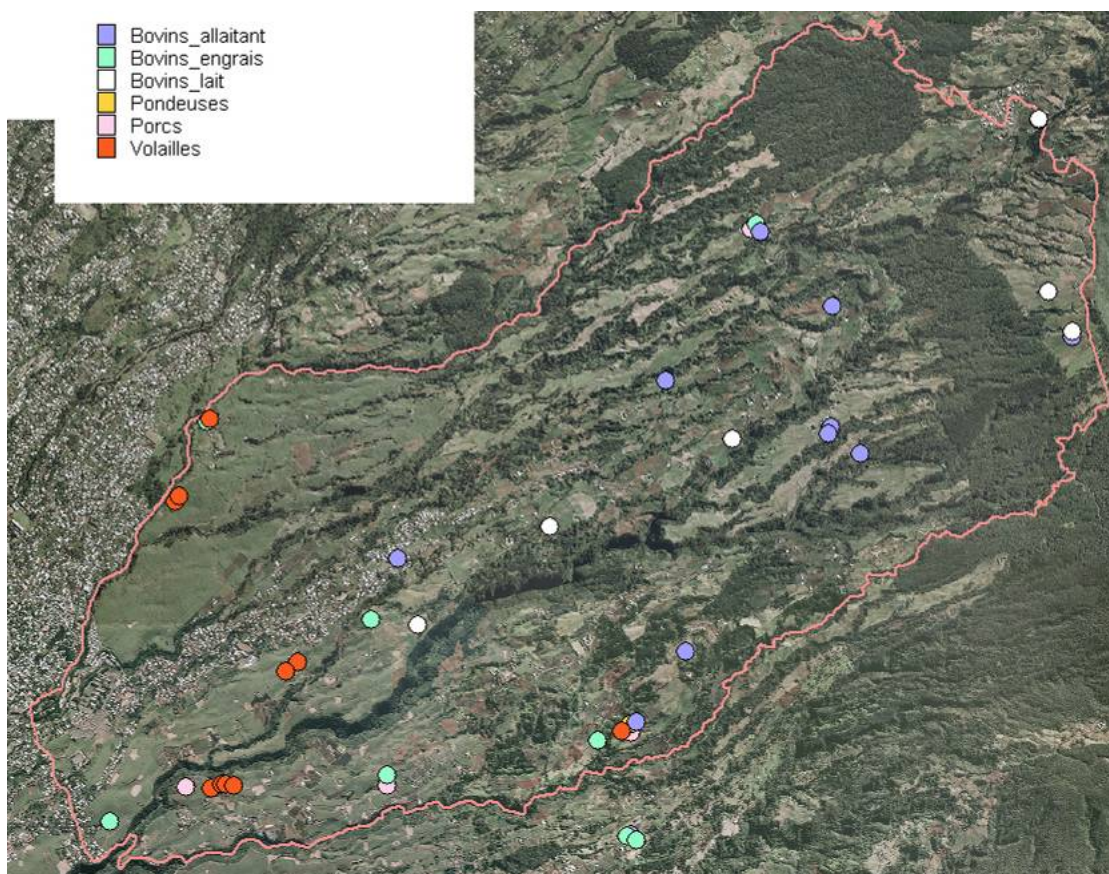
Le recensement des exploitations d'élevage dans la zone d'étude fait état de (figure 4) :

- 11 ateliers (*i.e.* bâtiments) de volailles (poulets de chair, poules pondeuses, poulettes et pintades) ;
- 8 ateliers de bovins à l'engraissement (dont 2 localisés hors de la zone d'étude mais présentant de nombreuses interactions avec leurs collègues de la zone) ;
- 6 ateliers de vaches laitières et les ateliers de génisses associés ;
- 4 ateliers de porcs (Truie Naisseur Engraisseur).

A ces 29 ateliers, dont la majeure partie des effluents sont maîtrisables (*i.e.* effluents récupérés, stockés et valorisés par épandage sur les cultures), s'ajoutent 11 exploitations de

bovins allaitants (et 3 exploitations de bovins à l'engrais dont la totalité des effluents sont directement restitués au pâturage).

Ce recensement ne considère que les élevages de taille économique (*i.e.* présentant un niveau de production suffisant permettant d'assurer le revenu principal de l'exploitant, contrairement à familial). Nous notons que les bâtiments de porcs et de volailles se situent dans la partie basse de la zone d'étude alors que les bâtiments d'élevage bovins sont répartis sur l'ensemble de la zone, avec une localisation des exploitations bovines laitières plutôt dans la partie haute de la zone.



**Figure 4 : Répartition des exploitations d'élevage de la zone sur l'orthophoto aérienne du Petit Tampon et Grand Tampon (source BD Topo, 2005)**

En fonction des différentes caractéristiques des élevages considérés (type d'animaux, effectifs, mode de logement, type d'effluent, temps de présence en bâtiment, dilution...) nous avons calculé les quantités d'effluents produits en utilisant les références du Corpen [1996, 1999, 2001 et 2003], ainsi que les quantités d'éléments N,  $P_2O_5$  et  $K_2O$  produites. Ces références prennent en compte les pertes en azote par volatilisation dans le bâtiment et pendant le stockage des effluents. Les résultats obtenus correspondent donc aux quantités d'éléments dits « maîtrisables ».

Les références Corpen ont été retenues en accord avec des professionnels locaux (conseillers agricoles de la FRCA, de la Sicalait, de la Scaar, de la CPPR et de la SicaRévia). Ces références ne sont pas des normes. Elles peuvent être adaptées si l'on dispose de résultats de mesure plus précis. Pour convertir les éléments P et K en anhydride phosphorique ( $P_2O_5$ ) ou en oxyde de potassium ( $K_2O$ ), il suffit de multiplier les valeurs P et K par les coefficients 2,29 et 1,20.

Nous présentons ci-dessous pour chacune des 3 filières de production animale (porcin, volaille, et bovin) les hypothèses retenues pour le calcul de la production d'effluents.

Dans les équations présentées ci-dessous, pour les calculs des quantités de P et K remplacer N par P et par K.

### II-3-1. Estimation des rejets des élevages de porcs

Les 4 ateliers de TNE produisent du lisier dilué dont les quantités d'éléments N, P et K produits annuellement peuvent être calculés selon l'équation 1 :

$$\text{Quantité de N maîtrisable (t/an)} = 1,25Q_{\text{TNE}} \times [N_{\text{rej/TRU}} + (Q_{\text{P/TNE}} \times N_{\text{rej/PS}}) + (Q_{\text{P/TNE}} - (Q_{\text{P/TNE}} \times \text{Corr}_N)) \times N_{\text{rej/ENG}}]$$

**Équation 1**

Les valeurs retenues pour les différents paramètres sont présentées dans le tableau 2 [Corpen 2003].

La quantité d'effluents produite est estimée selon l'équation 2 :

$$\text{Quantité effluents (m}^3\text{/an)} = 1,25Q_{\text{TNE}} \times 20\text{m}^3$$

**Équation 2**

**Tableau 2 : Paramètres pour l'estimation des rejets de N, P et K par les élevages de porcs**

Termes équation	Désignation	Effectif	N	P	K
$Q_{\text{TNE}} \times 1,25$	Nombre de TNE dans l'élevage majoré de 25 %	-	-	-	-
$Q_{\text{P/TNE}}$ (porcs/truie/an)	Nombre de porcs produits par TNE par an	17	-	-	-
$N_{\text{rej/TRU}}$ (kg/an)	Quantité d'azote rejeté par une truie présente recevant une alimentation standard	-	17,5	6,11	9,08
$N_{\text{rej/PS}}$ (kg/porc)	Quantité d'azote rejeté par un porc en post-sevrage de 8 à 30 kg	-	0,44	0,14	0,31
$N_{\text{rej/ENG}}$ (kg/porc)	Quantité d'azote rejeté par un porc en engraissement de 30 à 112 kg	-	3,25	0,92	1,84
$\text{Corr}_N$ (kg/kg poids suppl. à l'abattage)	Correction apportée au rejet, pour les porcs abattus présentant un poids supérieur à 112 kg	-	0,048	0,016	0,027

Le nombre de TNE déclaré est majoré de 25% pour tenir compte des cheptels réellement présents dans les élevages [Delaburthe, com. pers.].

### II-3-2. Estimation des rejets des élevages de volailles

Les hypothèses de calcul retenues sont présentées dans le tableau 3 [Corpen, 1996]. L'équation 3 retenue pour l'estimation de ces rejets N, P et K est :

Quantité de N maîtrisable (kg/an) = Nombre d'animaux produits par an x N	<b>Équation 3</b>
--------------------------------------------------------------------------	-------------------

La quantité d'effluents produite est estimée selon l'équation 4 :

Quantité d'effluent (t/an) = Nombre d'animaux x Quantité d'effluent par animal	<b>Équation 4</b>
--------------------------------------------------------------------------------	-------------------

**Tableau 3 : Paramètres pour l'estimation des rejets de N, P et K par les élevages de volailles**

Type d'animaux	Quantité d'effluent (kg/animal)	N (kg/animal)	P (kg/animal)	K (kg/animal)
Pintade	3,75 (litière)	0,06	0,02	0,02
Poulet de chair standard	1,96 (litière)	0,03	0,01	0,02
Poule pondeuse	40 (fientes)	0,45	0,22	0,33

### II-3-3. Estimation des rejets des élevages bovins

Les hypothèses de calcul retenues sont présentées dans le tableau 4 [Corpen, 1999 ; Corpen, 2001]. L'équation 5 retenue pour l'estimation de ces rejets N, P et K est :

Quantité de N maîtrisable (kg/an) = Effectif moyen x N x durée de présence annuelle dans le bâtiment/durée de présence annuelle dans l'exploitation	<b>Équation 5</b>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------

Les durées de présence pour les tous les lots de tous les élevages bovins ont été fournis par les conseillers agricoles. Ces durées correspondent aux informations utilisées pour ces mêmes élevages lors de leur Dexel (*i.e.* Diagnostic environnement de l'exploitation d'élevage).

**Tableau 4 : Paramètres pour l'estimation des rejets de N, P et K par les élevages bovins laitiers, allaitants et à l'engrais pour un animal**

Type d'animaux	Désignation	Quantité d'effluent (t ou m <sup>3</sup> /an)	N	P	K
VL6 (kg/an)	Vache laitière 6 000 kg de lait / lactation	15,6	85	16,61	98,33
G0 (kg/an)	Génisse < 1 an	4,7	25	3	28,33
G1 (kg/an)	Génisse 1 à 2 ans		42	7,92	54,14
G2 (kg/an)	Génisse > 2 ans		53	10,72	98,37
VA+v (kg/an)	Vache allaitante + veau		92	20,09	122,50
BV1 (kg/an)	Bovin viande 1 à 2 ans		27	7,86	29,17
BV1-5 (kg/an)	Bovin viande		40	10,93	38,33

### II-3-4. Définition et classement des effluents selon leurs propriétés agronomiques

Le terme d'effluent d'élevage ou d'engrais de ferme recouvre une grande diversité de produits. On ne revient pas ici sur la définition du lisier, du fumier, etc. Mais sur la valeur agronomique de ces effluents en tant qu'engrais organiques (fertilisent la culture), engrais organo-minéraux (fertilisent la culture) et en tant qu'amendements organiques (améliorent les propriétés agronomiques du sol).

Selon Chabalier et al [2006], on peut classer les effluents d'élevage produits dans la zone en engrais organiques et en amendements organiques (tableau 5).

**Tableau 5 : Classement des effluents d'élevages produits dans la zone d'étude en fonction de leurs action sur la culture ou sur le sol**

Engrais organique	Amendements organiques
Lisiers de porcs	Fumiers de bovins
Lisiers de bovins	Litières de volailles
Fientes de volailles	
Litières de pintades	

### II-3-5. Règles d'attribution des effluents aux cultures

Les règles d'attribution des effluents sur les différentes cultures présentes sur la zone sont tirées de Aubry et al [2006] modulées en fonctions des pratiques culturales sur la zone. Nous distinguons 3 catégories :

- Catégorie 1 : les cultures pérennes en production (par opposition aux replantations). Elles comprennent la canne à sucre et les fourrages. Ces cultures reçoivent préférentiellement des engrais organiques. L'ordre de priorité concernant la canne à sucre est le suivant : lisier de porcs, lisier de bovins, fientes de volaille et litière de pintades. Pour les cultures fourragères, les attributions se feront selon l'ordre suivant : lisier de bovins, lisier de porcs, fientes de volailles et litière de pintades.
- Catégorie 2 : les cultures pérennes en replantation. A intervalles réguliers, ces cultures doivent être replantées pour régénérer la production : la replantation peut donner lieu à un épandage d'amendement organique. Les cultures concernées sont la canne à sucre et les fourrages. L'ordre de priorité est le suivant : fumier de bovins, litière de volailles.
- Catégorie 3 : les cultures maraîchères et semi-pérennes. Elles comportent les cultures de plein champ donnant lieu à un travail du sol mécanisé et utilisant divers amendements organiques. L'ordre de priorité est : litière de volailles, fumier de bovins.

## II-4. Besoins des cultures

Afin de calculer les besoins des cultures en éléments nutritifs, en particulier l'azote, nous développerons une approche basée sur le principe de la fertilisation raisonnée.

### II-4-1. Principe de la fertilisation raisonnée

Une définition de la fertilisation raisonnée a été proposée par le Comifer (cf. [www.comifer.asso.fr](http://www.comifer.asso.fr)), lors de la 4<sup>ème</sup> conférence de l'IMPHOS, en septembre 1992 : « la fertilisation raisonnée est l'ensemble des règles agronomiques et pratiques, qui :



- organisées suivant une logique cohérente du double point de vue de l'agriculteur (qui agit) et de l'agronome (qui conseille)
- permettent au chef d'exploitation d'éclairer ses choix en matière d'apport de fertilisants (minéraux et organiques) en vue d'atteindre les objectifs quantitatifs et qualitatifs de production qu'il se fixe dans le cadre du système de culture et de potentialités pédoclimatiques dans lequel il agit
- tout en conservant, voire améliorant, les caractéristiques écologiques dudit milieu. »

L'objectif de cette approche est de déterminer la quantité d'éléments minéraux à apporter sur une culture en vue d'obtenir un rendement fixé (à définir), tout en limitant les risques de pollutions (excès d'azote ou de phosphore). Les doses d'éléments apportées doivent compenser les exportations (supposées proportionnelles au rendement visé par l'agriculteur), en tenant compte de la fourniture du sol en éléments minéraux. On parle de bilan prévisionnel.

L'azote est considéré comme le premier élément limitant des rendements pour l'ensemble des cultures de la zone d'étude. Le choix de la méthode s'est donc basé en priorité sur cet élément. La démarche employée est cependant la même pour les éléments phosphore (P) et potassium (K). Pour le calcul de la fertilisation azotée, deux équations existent :

1. l'équation de bilan massique de l'azote : il s'agit d'un bilan de masse réalisé entre deux dates sur l'azote minéral contenu dans une couche de sol d'épaisseur fixée. Ce bilan intègre l'ensemble des facteurs qui interviennent dans la dynamique de l'azote minéral et organique : processus de volatilisation et dénitrification et autres pertes, minéralisation de l'azote organique du sol et des résidus de récolte, etc. La figure 5 illustre ce bilan massique de l'azote.
2. l'équation d'efficacité de l'azote n'est pas un bilan au sens strict du terme. Ce mode de calcul se base sur des témoins non fertilisés (estimation de la fourniture effective du sol en azote), et des coefficients d'efficacité de l'azote, mesuré par voie expérimentale.

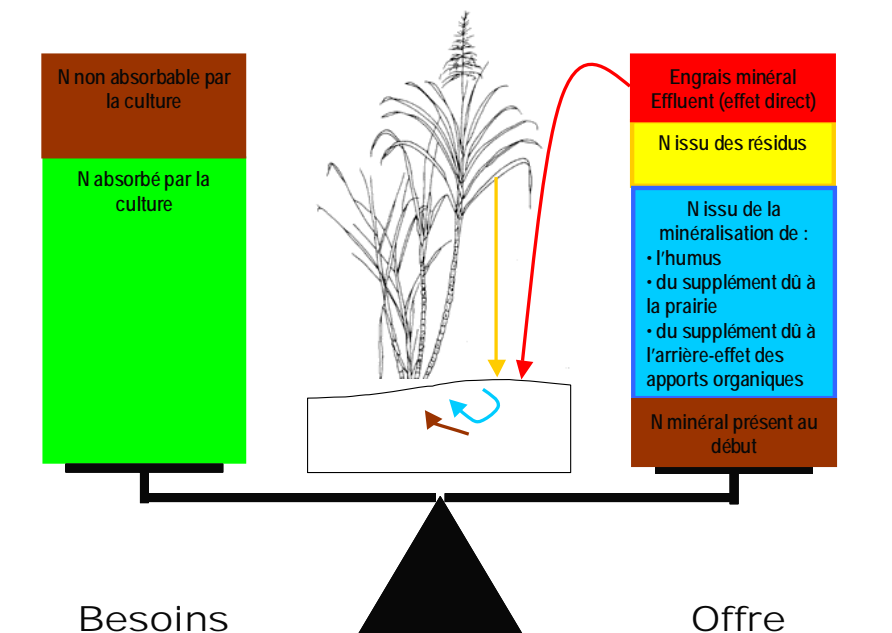


Figure 5 : Principe illustré du bilan prévisionnel visant à équilibrer les deux plateaux de la balance en estimant chaque poste



Nous avons choisi d'utiliser l'équation d'efficience de l'azote pour les deux raisons suivantes :

1. difficultés à estimer ou mesurer l'ensemble des postes du bilan notamment pour la minéralisation de la matière organique et les pertes en raison du contexte de sol superficiel ;
2. des résultats de détermination du Coefficient Apparent d'utilisation de l'azote d'un engrais de synthèse à partir d'essai au champ sur la canne à sucre étaient disponibles.

Dans ce cadre, un apport raisonné de produits organiques repose sur quatre points :

1. Une analyse de sol ;
2. Un calcul de fertilisation ;
3. Une analyse du produit organique apporté au sol ;
4. Un calcul de dose du produit organique à épandre et de la complémentation minérale en azote, phosphore et/ou potasse si les apports organiques ne couvrent pas les besoins de la culture.

L'écriture de l'équation d'efficience de l'azote est la suivante (Equation 6) :

$$N_f = N_0 + CAU \times N$$

**Équation 6**

$N_f$  = Besoin total du peuplement végétal en azote, qui dépend du niveau de rendement recherché (kg/ha) ;

$N_0$  = Quantité d'azote absorbée par une culture non fertilisée (azote fourni par le sol en kg/ha) ;

CAU = Coefficient Apparent d'Utilisation de l'azote minéral, dépendant de la culture et des conditions de culture (explication ci-après) ;

N = Quantité d'azote minéral apportée par les fertilisants (kg/ha).

## **II-4-2. Besoin total des cultures en azote $N_f$**

### **II.4.2.1 Canne à sucre**

Les objectifs de rendement des parcelles de canne à sucre sont contenus dans la base de données des potentialités agricoles de la Réunion, dans laquelle il est mentionné, à dire d'expert, un rendement potentiel maximal par îlot. Il existe une autre base disponible au Centre Technique Interprofessionnel de la Canne et du Sucre avec cette fois les rendements réalisés par les agriculteurs au niveau de leur exploitation. Nous avons retenu les rendements de la base des potentialités agronomiques pour deux raisons :

1. Les rendements affichés sont très proches de ceux observés ;
2. Disponibilité de l'information plus facile, puisqu'elles ne sont pas nominatives.

Ces rendements sont affectés aux parcelles individuelles en utilisant les fonctions de jointure géographique du SIG MapInfo.

Face à ces objectifs de rendement, nous avons associé le besoin de la culture en azote en utilisant l'outil « Expocan3 » réalisé à partir du tableur Excel et qui détermine les besoins en fertilisation de la culture en fonction des exportations minérales [Chabaliér et Renault, 1998]. Ainsi à chaque valeur de rendement escomptée est associée une quantité d'azote minéral nécessaire pour satisfaire ce rendement.

### II.4.2.2 Prairies

Ces potentialités sont déterminées en fonction de la pente des parcelles qui conditionne leur utilisation. L'affectation des rendements escomptés et des besoins en azote ont été réalisés à l'aide du SIG MapInfo.

- Si la pente de la parcelle est comprise entre 0 et 15 % alors la parcelle est considérée comme une prairie de fauche ayant une production escomptée de 15 TMS/ha/an. Le besoin annuel en azote est de 428 kg/ha.
- Si la pente de la parcelle est supérieure à 15% alors la parcelle est considérée comme une prairie de pâture ayant une production escomptée de 10 TMS/ha/an. Le besoin annuel en azote est de 285 kg/ha [Barbet-Massin et al, 2004], mais dans ce cas là elle ne reçoit pas d'effluents dits maîtrisables.

Nous avons considéré les mêmes niveaux de rendement et de besoin annuel en azote dans l'hypothèse où la pente maximale est fixée à 20%.

### II.4.2.3 Autres cultures

Les parcelles d'ananas et de fraisiers ne feront pas l'objet d'apport d'engrais organiques pour des raisons sanitaires, phytosanitaires et de facilité d'incorporation au sol (cultures sous film plastique). Un apport d'amendement organique de 15 t/ha pour l'ananas et de 10t/ha pour les fraisiers est effectué tous les deux ans. Nous considérerons que la moitié des surfaces plantées en ananas et en fraises sont replantées chaque année et qu'elles sont amendées, par défaut, par du fumier de bovins. En pratique, elles sont généralement amendées par des écumes de sucrerie importées.

Les surfaces en maraîchage, de même que celles consacrées à la culture des ananas et des fraises, ne font pas l'objet d'apport d'engrais organiques liquides pour des raisons sanitaires. Cependant, dans le cadre de cette étude nous envisageons un apport d'amendement organique sous forme de litière de volailles à raison de 20t/ha et par an.

Les surfaces mises en valeur par le géranium ne font pas l'objet d'apport d'engrais organiques. En revanche comme pour le maraîchage nous envisageons un apport d'amendement organique sous forme de litière de volailles à raison de 20t/ha et par an.

### II-4-3. Azote fourni par le sol $N_0$

Le conseil en fertilisation azotée rend compte de la capacité du sol à libérer de l'azote par minéralisation de sa matière organique. La quantité potentielle d'azote minéralisable  $N_{min}$  dans les 30 centimètres de sol utilisés par la plante est calculée selon l'équation 7 [Pouzet et al, 1998] :

$$N_{min} = C_m \times d_a \times N_t \times 0,3 \times 10^4$$

**Équation 7**

$N_{min}$  = Quantité potentielle d'azote minéralisable par le sol (kg/ha)

$C_m$  = Coefficient de minéralisation (%)

$d_a$  = Densité apparente du sol (kg/dm<sup>3</sup>)

$N_t$  = Teneur en azote total de l'échantillon de sol (g/kg)

$0,3 \times 10^4$  = Coefficient lié à la masse de sol

Le tableau 6 présente les caractéristiques des grands types de sols réunionnais. La zone d'étude est quant à elle caractérisée par un sol andique dans sa partie basse et un sol andique perhydraté dans sa partie haute. La disponibilité des résultats d'analyse de sol dans la zone, issues de la base de données des analyses de sols du laboratoire d'agronomie du Cirad à la Réunion, va nous permettre de calculer les quantités d'éléments nutritifs fournis par le sol. Ces calculs ont été réalisés pour N, P et K.

**Tableau 6 : Caractéristiques des grands types de sols réunionnais [Pouzet et al, 1998]**

Unité de sol	Brun	Brun andique	Andique	Andique perhydraté
Densité apparente (t/m <sup>3</sup> )	1,3	0,9	0,8	0,6
Coefficient de minéralisation (%)	2,5	1,8	1,0	1,0

Faute d'éléments pour les chiffrer, les pertes d'azote par lixiviation et dénitrification ne sont pas prises en compte dans les coefficients de minéralisation. Il en va de même de paramètres tels que la température et l'humidité qui conditionnent la minéralisation. Toutefois, il a été mis en évidence dans les études de caractérisation des matières organiques à l'île de la Réunion que la température avait un effet complexe sur la dynamique de minéralisation de l'azote et du carbone. Cet effet a été évalué pour les deux grands types de sols de la Réunion (andosol et sol brun). A partir de la loi de Van't Hoff, l'établissement du coefficient thermique et du facteur d'inhibition des réactions biochimiques Q<sub>10</sub> pour les températures de 20°C et 28°C permettent de comparer les différences de minéralisation sur des produits tels que la vinasse, le lisier de porc, la paille de canne à sucre, le mélange lisier-paille et le mélange vinasse-lisier [Chabalier et al, 2003].

Suite à une analyse approfondie des résultats d'analyses, nous avons attribué des valeurs d'azote minéralisé, potentiellement utilisable par les cultures, aux parcelles en utilisant une fonction d'interpolation du SIG MapInfo. On considère ici que les arrières effets azote des anciens apports d'engrais de ferme sont estimés globalement, avec ceux de l'humus du sol.

Ainsi, pour la zone, 374 résultats d'analyse de sol ont été repérés dans la base de données des analyses de sols du laboratoire d'agronomie du Cirad. Ces analyses de sol ont été réalisées entre 1986 et 1999.

Sur 374 échantillons nous avons éliminé 232 échantillons dont les valeurs en N, P et K étaient supérieures ou inférieures aux seuils théoriques contenus dans le tableau 7 pour les sols andiques. Sur les 232 échantillons éliminés 104 présentent des teneurs en azote très faibles ; ceci nous laisse penser que ces sols sont fortement sollicités et peu amendés.

**Tableau 7 : Seuils d'interprétation des analyses de sol**

Nutriment	Seuil bas	Seuil haut
N <sub>tot</sub> (g/kg)	Très faible <3,0 (And) et 4,0 (Andp)	Très fort >12 (And) et 16,5 (Andp)
P <sub>ass</sub> (mg/kg)	Très faible <100	Très fort >600
K <sub>éch</sub> (mé/100g)	Très faible <0,1	Très fort >1,50

And = Andosol non perhydraté ; Andp = Andosol perhydraté

La moyenne des éléments NPK a été calculée pour les échantillons prélevés au même point afin de n'obtenir qu'un seul point avec des caractéristiques moyennes.

Suite à cette manipulation, nous disposons de 130 analyses réparties sur la zone d'étude, permettant ainsi de caractériser l'apport du sol en éléments nutritifs.

L'attribution des apports de NPK aux parcelles en fonction de la répartition des analyses a été réalisée de la manière suivante :

- Si un échantillon est inclus dans la parcelle, alors les valeurs NPK sont directement attribuées à cette parcelle.
- Si plusieurs échantillons sont inclus dans la parcelle, alors les valeurs moyennes NPK sont attribuées à la parcelle.

Sur les 130 échantillons, 56 ne sont pas directement contenus dans des parcelles de notre zone d'étude. 24 sont très proches des bordures parcellaires. Il s'agit très certainement d'un décalage lié à leur positionnement manuel sur la carte par le technicien ayant effectué le prélèvement. Ces points ont été repositionnés dans les parcelles auxquelles ils correspondent vraisemblablement. A l'issue de cette manipulation, 71 parcelles sur 291 disposent de caractéristiques NPK. Il reste 32 échantillons hors parcelles et 220 parcelles restent à caractériser.

Dans le contexte réunionnais, nous avons à faire à des sols très hétérogènes sur des distances faibles, il est donc difficile d'attribuer, selon une règle simple une valeur de fourniture d'azote par le sol à une parcelle pour laquelle nous n'avons pas d'analyse. L'utilisation d'une méthode géostatistique semble appropriée. Afin d'attribuer des caractéristiques NPK aux 220 parcelles restantes, nous avons utilisé la méthode d'interpolation Inverse Distance Weighting (IDW) qui s'appuie sur une moyenne mobile calculée en fonction des points avoisinants [Cf. Annexe § IX-1]. Elle permet de lisser les valeurs des données originales et d'estimer les tendances locales. Cette interpolation a été réalisée en utilisant le SIG MapInfo qui calcule les tendances à partir d'une grille. La taille des mailles de la grille, les points et les valeurs sources étant connues, MapInfo calcule une valeur pour chaque maille. Cette valeur se détermine en calculant une moyenne pondérée par la distance des points situés dans le rayon de recherche spécifié. Les points sont pondérés inversement par leur distance par rapport au centre de la maille. Dans IDW, il est possible de paramétrer un facteur d'influence qui détermine l'influence que chaque point aura sur le résultat. Plus ce facteur est élevé plus l'influence des points proches est grande sur la valeur de la maille. Le résultat de cette interpolation est présenté dans la figure 6.

Les valeurs NPK attribuées aux 220 parcelles restantes sont les moyennes des valeurs des mailles incluses dans chacune des parcelles.

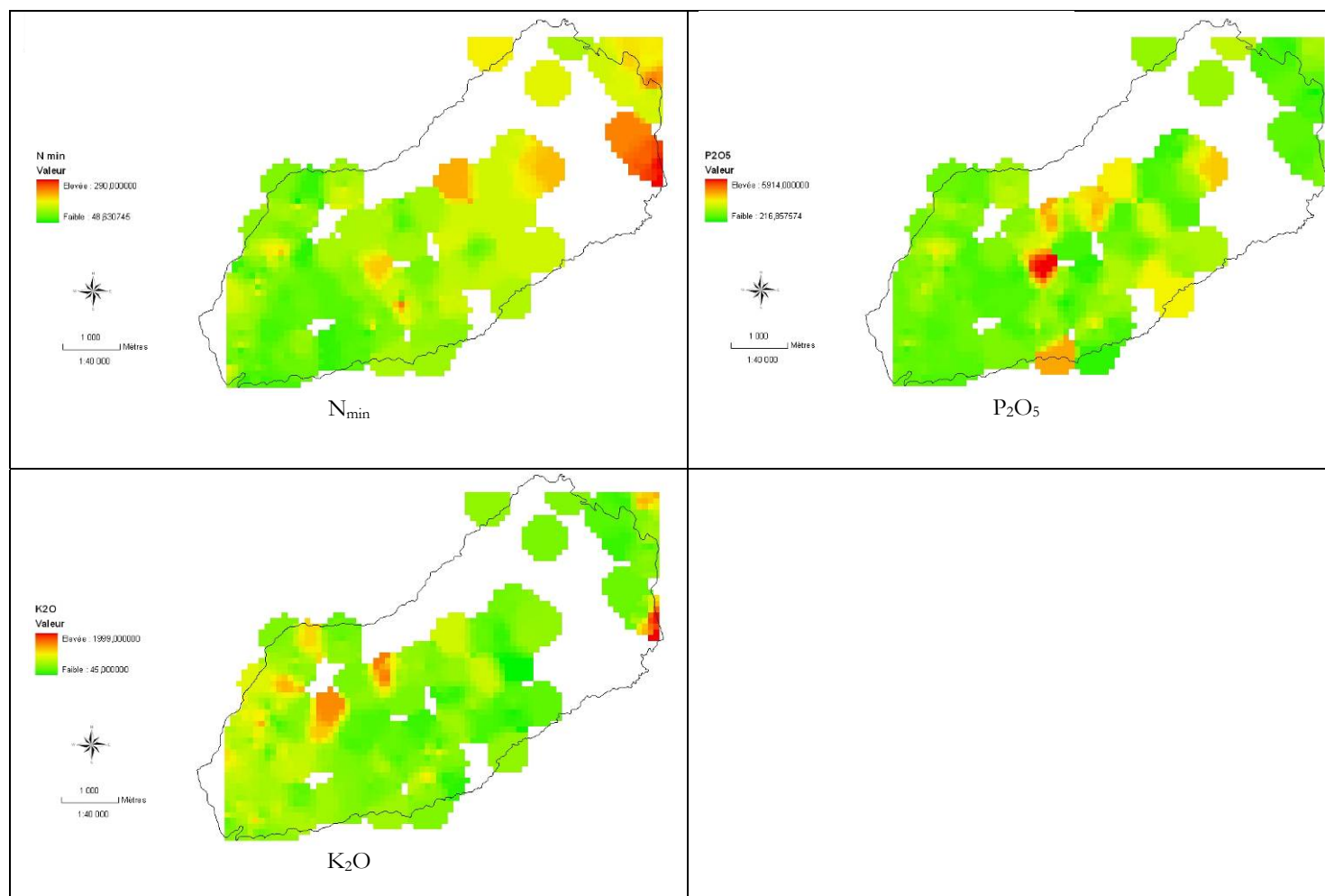


Figure 6 : Fourniture du sol en  $N_{\min}$ ,  $P_2O_5$  et  $K_2O$  (kg/ha) calculée par interpolation IDW

#### II-4-4. Coefficient Apparent d'Utilisation : CAU

Le Coefficient Apparent d'Utilisation de l'équivalent azote engrais minéral est la proportion d'azote minéral apparemment absorbé par la plante [Bodet et al, 2001]. Il apprécie « l'efficacité » d'absorption de l'élément par la plante (il existe un CAU pour chaque élément N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et K<sub>2</sub>O). Le CAU correspond à la quantité d'azote absorbée par la culture moins la quantité d'azote absorbée par le témoin non fertilisé rapporté à la quantité d'azote totale appliquée sur la culture.

Les facteurs de variation de cette efficacité sont : la culture réceptrice (niveau des besoins en azote, période d'expression de ces besoins, période d'occupation du terrain...), le climat moyen de la région (minéralisation de l'azote organique du sol, volatilisation de l'ammoniac lors de l'épandage, lessivage des nitrates...).

Dans notre cas le CAU est fixé à 0,5 pour N ; 0,6 pour P ; 1 pour K. Ces coefficients sont issus d'expérimentations sur les taux d'utilisation de l'azote par la canne à sucre à la Réunion et à Maurice [NG Kee Kwong et Deville, 1992 ; Chabalier et Renault, 1998].

L'idéal aurait été de disposer d'un tableau rassemblant l'ensemble des CAU pour chacune des cultures en fonction :

- de l'effluent appliqué ;
- de la saison (été et hiver) ;
- de leur positionnement le long du gradient altitudinal (bas et haut) ;
- de l'irrigation ;

Afin de mieux prendre en considération l'efficacité de l'azote en fonction de la température et de la présence/absence d'eau.

#### II-5. Azote apporté par les fertilisants engrais minéral et effluents d'élevage

L'objectif est de déterminer la quantité d'azote à apporter à la culture par les effluents d'élevage et par les engrais minéraux dans le cas d'une fertilisation mixte. En considérant l'azote minéral à effet direct contenu dans les effluents d'élevage, l'équation 6 devient l'équation 8 :

$$N_f = N_0 + CAU \times (N_{em} + N_{ef})$$

**Équation 8**

$N_{em}$  = Quantité d'azote minéral apporté par l'engrais de synthèse (kg/ha) ;

$N_{ef}$  = Quantité d'azote minéral (effet direct) apportée par l'engrais de ferme (kg/ha).

##### II-5-1. Coefficients d'équivalence des effluents à l'engrais minéral : CEA

En ce qui concerne l'effluent apporté, l'arrière effet étant intégré séparément au calcul, cette quantité  $N_{ef}$  correspond à l'effet direct azote de l'effluent. L'évaluation de ce dernier se fait grâce au **Coefficient d'Equivalence Azote** (*i.e.* CEA engrais minéral), qui est caractéristique de l'effluent apporté. Ce coefficient « corrige » l'effet nutritif des effluents (à cause des pertes, réorganisations,...). Cette définition est valable pour les éléments P et K. Dans le cas de l'azote, il permet de calculer la masse d'ammonitrate ayant le même effet sur la production d'une culture que la masse d'azote total de l'effluent apporté. L'équation 9 permet de calculer la quantité  $N_{ef}$  connaissant la quantité d'effluent apportée :

$$N_{ef} = N_{tef} \times CEA$$

Équation 9

$N_{tef}$  = Quantité totale d'azote apportée par l'effluent

CEA = Coefficients d'équivalence des effluents à l'engrais minéral (tableau 8)

**Tableau 8 : Coefficients d'équivalence engrais minéral (CEA) utilisés dans cette étude [Bodet et al, 2001]**

Elément	Coefficients d'Equivalence Azote engrais minéral		
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Engrais minéral	1	1	1
Lisier de porcs	0,5	0,85	1
Lisier de bovins	0,5	1	1
Fientes de volailles	0,6	0,65	1
Litière de volailles	0,5	0,65	1
Litière de pintades	0,5	0,65	1
Fumier de bovins	0,3	1	1

L'estimation de l'« équivalence azote engrais minéral » d'un engrais de ferme provient d'essai au champ. La mesure de l'azote absorbé par une culture recevant 4 à 5 niveaux d'apport d'azote engrais minéral (dont un témoin zéro) permet de tracer la courbe des absorptions d'azote en réponse à des doses croissantes d'azote d'engrais minéral apporté. La mesure de l'azote absorbé par un traitement « engrais de ferme » permet d'évaluer un équivalent azote engrais minéral de l'azote total de l'engrais de ferme [Bodet et al, 2001]. Ce coefficient d'équivalence dépend lui aussi des périodes d'apport de l'engrais de ferme de son mode d'incorporation (en surface ou injecté) et du climat (notamment des précipitations). Les coefficients retenus ici sont des coefficients moyens.

L'équation 8 devient alors l'équation 10 :

$$N_f = N_0 + CAU [N_{em} + (N_{tef} \times CEA)]$$

Équation 10

Le besoin de fertilisation de la culture est déterminé par l'équation 11 :

$$(N_f - N_0) / CAU = N_{em} + (N_{tef} \times CEA)$$

Équation 11

Dans le cas d'une fertilisation mixte, nous aurons :

$$N_{tef} = a \times [(N_f - N_0) / (CAU \times CEA)]$$

Équation 12

et

$$N_{em} = (1-a) \times [(N_f - N_0) / CAU]$$

Équation 13

Avec  $0 \leq a \leq 1$

Connaissant  $N_f$ ,  $N_0$ ,  $CAU$ ,  $N_{tef}$  et  $CEA$ , il est facile d'obtenir le volume d'effluent à épandre sur la culture à fertiliser.

Le volume d'engrais de ferme à épandre sera le rapport de  $N_{tef}$  / la teneur en azote de l'engrais de ferme choisi.

L'équation 11 s'applique pour toutes les cultures (canne à sucre, maraîchage, culture pérennes). Pour les prairies pâturées, elle prend la forme (équation 14) :

$$(N_f - N_0 - N_{\text{rest}} - N_{\text{leg}}) / \text{CAU} = N_{\text{em}} + (N_{\text{tef}} \times \text{CEA})$$

Équation 14

$N_{\text{rest}}$  = contribution azotée directe des restitutions au pâturage de l'année

$N_{\text{leg}}$  = contribution azotée de la fixation symbiotique à l'alimentation azotée de la prairie

La contribution azotée de la fixation symbiotique à l'alimentation azotée de la prairie est difficilement considérable en raison du manque d'informations sur les caractéristiques des prairies et en particulier sur leur composition, dans la base de données parcellaire.

Dans cette étude, étant données les hypothèses retenues l'épandage d'effluents d'élevage sur les prairies pâturées n'est pas considéré puisque ces prairies présentent des pentes supérieures à 15 ou 20%. Un changement d'hypothèse amènerait à mettre en œuvre ce calcul spécifique pour la fertilisation des prairies.

## II-6. Besoins des cultures adaptés en fonction de la réglementation relative à l'épandage

Afin de déterminer l'aptitude des parcelles à l'épandage, il est primordial de pouvoir appliquer les contraintes liées à la réglementation à travers la cartographie. Le SIG apparaît alors comme l'outil le plus adapté pour répondre à ces besoins de traitement de l'information spatiale réglementaire (*i.e.* distances d'isolement par rapport aux bâtiments, cours d'eau, bassins et pentes...) permettant ainsi d'exclure les surfaces inadaptées à l'épandage.

Le dispositif réglementaire relatif à la gestion des effluents au niveau des exploitations d'élevage varie selon le régime dont relève l'élevage (l'atelier). La loi prévoit 2 régimes qui déterminent le niveau de risque de l'élevage sur la simple base d'effectifs d'animaux présents simultanément dans l'atelier :

1. Le Règlement Sanitaire Départemental (RSD)
2. Les Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE)

Ces deux régimes prévoient, respectivement, un corpus de prescriptions techniques qui sont pour :

- Le RSD, conformément au Code de la Santé Publique, des prescriptions en matière d'hygiène et de salubrité.
- Les ICPE, des prescriptions qui visent à éviter toute pollution des eaux superficielles, des nappes phréatiques et toutes les nuisances occasionnées par l'élevage.

Les régimes RSD et ICPE sont indépendants ; L'un se substituant à l'autre lorsque la taille de l'élevage change. Quelque soit le régime auquel est soumis l'élevage, l'exploitant agricole est responsable des déchets qu'il produit et des incidences qu'ils peuvent engendrer sur le milieu jusqu'à leur destination finale.

Le problème du choix d'appliquer la réglementation épandage RSD ou ICPE se pose dans cette étude. En effet, les élevages soumis à déclaration ou autorisation, *i.e.* classés en ICPE, et les élevages de taille moins grande dépendant du RSD et ne présentant pas de plan d'épandage, ne sont pas tenus de respecter les mêmes contraintes. La principale différence, apparaissant dans le RSD plus contraignant, étant la distance d'exclusion de 200 mètres des cours d'eau dans le cas où la pente du terrain est supérieure à 7%. Cette distance n'est que de 35 m dans le cas de la réglementation sur les ICPE.

Sachant que 70 % de l'azote maîtrisable provient d'élevages soumis à la réglementation ICPE ou RSD avec un plan d'épandage, il semble justifié d'appliquer les exclusions en lien avec la réglementation ICPE sur l'ensemble de la zone.



Les calculs des besoins des cultures ont été effectués en tenant compte des surfaces potentiellement épandables. Ces superficies ont été obtenues en appliquant les distances minimales d'épandage autour de sites spécifiques imposées par la réglementation ICPE (tableau 9).

**Tableau 9 : Distances minimales d'épandage relatives à la réglementation ICPE**

	Type d'effluent			
	Fumiers	Fientes de + de 65% de matières sèches	Litières de volailles	Lisiers et purins
Habitations de tiers ou tout local habituellement occupé par des tiers	50 m (1)	50 m	50 m	50 m (2)
Points de prélèvement d'eau destinée à l'alimentation des collectivités humaines ou des particuliers	50 m	50 m	50 m	50 m
Berges des cours d'eau	35 m	35 m	35 m	35 m

(1) Fumiers après stockage minimum de 2 mois dans l'installation.

(2) Mise en œuvre d'un traitement ou procédé atténuant les odeurs.

De plus, l'épandage est interdit sur les terrains de forte pente afin de prévenir des risques d'écoulement vers les cours d'eau ou d'accumulation en bas de pente. Ce critère de pente n'étant pas précisé, nous avons posé deux hypothèses de travail :

1. L'épandage est réalisé sur des parcelles dont la pente est inférieure ou égale à 15%
2. L'épandage est réalisé sur des parcelles dont la pente est inférieure ou égale à 20%

Ces zones d'exclusion ont été créées à en utilisant les couches de la BD Topo (bâti, cours d'eau, point de prélèvement d'eau) sur lesquelles nous avons appliqués l'outil « tampon » (*i.e.* buffer) du SIG MapInfo qui permet de définir une zone d'un rayon donné autour d'objets cartographiques identifiés. Le modèle numérique de terrain nous a permis quant à lui d'exclure les portions de parcelles dont la pente est supérieure à 15% et à 20%. Toutes ces surfaces non épandables ont ensuite été soustraites des parcelles contenues dans la base de données parcellaire.

## II-7. Calcul du bilan au niveau de la zone d'étude

### II-7-1. L'outil de calcul des besoins des cultures en fertilisant et du bilan : FertilMO

L'ensemble des données permettant le calcul des besoins des cultures a été rassemblé dans une base au format Microsoft Access (figure 7). Cette base de données est liée automatiquement au SIG MapInfo afin de permettre une jointure avec les objets géographiques que sont les parcelles et la représentation spatialisée des besoins des cultures en azote d'origine organique et leur complémentation minérale.

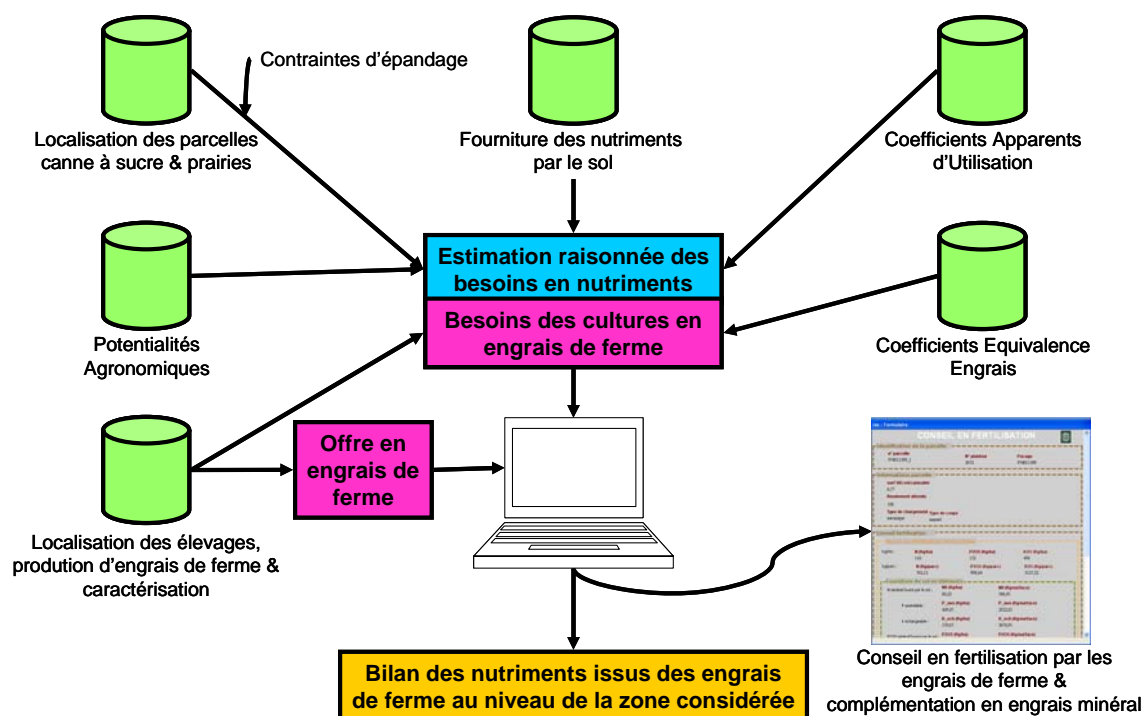


Figure 7 : Schéma de principe de l'outil informatique de calcul spatialisé des besoins des cultures en engrais de ferme et de calcul de l'adéquation entre l'offre en effluents d'élevage et les besoins des cultures dans une zone considérée

FertilMO permet, pour l'instant, de calculer les besoins des cultures en engrais de ferme. Il permettra dans un second temps de calculer le bilan (*i.e.* l'adéquation) entre l'offre en effluents d'élevage et les besoins des cultures d'une zone choisie, suivant l'équation 15 :

$$\text{Bilan} = \sum \text{offre en effluents d'élevage} - \sum \text{besoins des cultures en effluents d'élevage} \quad \text{Équation 15}$$

Le résultat de ce bilan sera différent en fonction des hypothèses que l'on aura choisies pour le calcul des besoins des cultures en effluents d'élevage.

## II-7-2. Scénarios de calcul des besoins des cultures

L'objectif pour les producteurs de matières organiques, notamment, est de valoriser au maximum leurs effluents d'élevage sur les cultures avec l'intérêt pour le consommateur de minimiser l'importation d'engrais minéral sur l'exploitation.

L'outil informatique de calcul de besoin des cultures en effluents d'élevage va nous permettre de tester une large gamme de scénarios de fertilisation (tableau 10).

Nous ne présenterons pas l'ensemble des scénarios possibles dans cette étude. Nous nous limiterons à la présentation et à la discussion des 3 scénarios suivants :

1. Fertilisation totale des cultures par les effluents d'élevage (niveau de substitution = 100%)
2. Fertilisation des cultures au deux tiers par les effluents d'élevage (niveau de substitution = 66%)
3. Fertilisation des cultures à moitié par les effluents d'élevage (niveau de substitution = 50%)

Ces scénarios sont construits sous deux hypothèses que nous rappelons ici :

1. L'ensemble des parcelles réglementairement épandables reçoivent des effluents d'élevage.

2. Aucune exportation ni importation de matière organique n'est effectuée dans la zone.

**Tableau 10 : Options possibles pour la construction des scénarios de calcul des besoins des cultures en fertilisation**

Choix réalisables pour la construction des scénarios de fertilisation	Culture à fertiliser	Canne à sucre/ Fourrage/ Autres cultures
	Saison pendant laquelle est réalisée l'épandage	1. Eté 2. Hiver
	Niveau de substitution de l'engrais minéral par les effluents	Toute la gamme entre 0 et 100%
	Engrais de ferme (en fonction de la culture choisie et de la compatibilité de la matière organique)	1. Lisier de porc 2. Lisier de bovin 3. Fientes de volailles 4. Fumier de bovin 5. Litière de volailles
	Caractéristiques de l'engrais de ferme	1. Corpen 2. Locales 3. Personnelles
	Surfaces Potentiellement Epandables	1. Réglementation ICPE jusqu'à une pente max. de 15 % 2. Réglementation ICPE jusqu'à une pente max. de 20 %
Résultats	Besoins des cultures en effluents d'élevage et complémentation en engrais minéral d'une parcelle choisie ou d'un groupe de parcelles	

Concrètement, ces scénarios peuvent être mis en œuvre en utilisant le formulaire de requête que nous avons développé (figure 8).

Paramètres : Formulaire

**Culture** : Fourrage

**Saison** : ete

**Niveau de substitution** : 0 = fertilisation 100% minérale, 1 = fertilisation 100% organique

**Engrais de ferme** : Litière de bovin

La liste des engrais de ferme disponibles est fonction de la culture que vous avez choisie (adéquation engrais de ferme / culture)

Ces valeurs CORPEN sont renseignées par défauts. Si vous disposez des caractéristiques de votre engrais de ferme alors vous pouvez les modifier.

N	P205	K2O
3,64	1,94	4,65

**Surfaces Potentiellement Epandables (SPE)** : ICPE\_15

Le calcul des SPE est fonction du régime réglementaire dont dépendent les élevages (RSD ou ICPE) et des seuils de pente (7, 10, 15 et 20%) au dessus desquels l'épandage des engrais de ferme liquides est interdit.

**Parcelle**

STOP OK Besoin groupe de parcelle

Figure 8 : Formulaire de requête permettant de calculer le besoin en effluent d'élevage d'une parcelle ou d'un groupe de parcelles

### III- RESULTATS

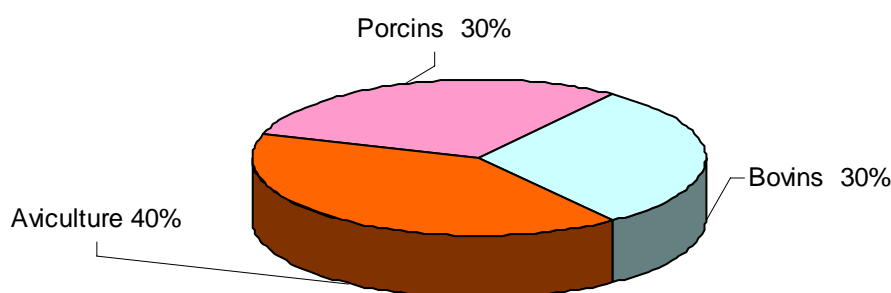
#### III-1. Estimation du stock de nutriments produits par les effluents d'élevage dans la zone du Petit Tampon-Grand Tampon

Avec les hypothèses retenues (cheptel, teneurs des effluents en éléments et temps de présence dans les bâtiments), la production de N,  $P_2O_5$ ,  $K_2O$  par les effluents d'élevage est regroupée dans le tableau 11. On distingue les éléments maîtrisables qui pourront être stockés et valorisés sur les cultures en fonction des choix de l'éleveur et les éléments non maîtrisables directement restitués au sol par les animaux lors de leurs déplacements dans le pâturage et susceptibles d'être considérés dans le calcul des besoins en fertilisation des prairies. Les résultats par filière d'élevage (porcs, volailles, bovins lait et bovins à l'engrais) sont présentés en détail dans les annexes § IX-2 à IX-5.

**Tableau 11 : Production totale de N,  $P_2O_5$  et  $K_2O$  issue des différents effluents d'élevages produits au Petit-Grand Tampon**

	Eléments maîtrisables (t/an)			Eléments non maîtrisables (t/an)		
	N	$P_2O_5$	$K_2O$	N	$P_2O_5$	$K_2O$
Lisier dilué de porcs	16,5	11,6	11,4	0,0	0,0	0,0
Lisier pailleux de bovins laitiers	4,7	2,1	6,6	14,3	6,4	19,9
Lisier pailleux de bovins à l'engrais	8,5	5,3	9,8	0,0	0,0	0,0
Litière de volailles	11,7	11	7,3	0,0	0,0	0,0
Litière de pintades	0,8	0,6	0,4	0,0	0,0	0,0
Fientes de volailles	9,0	10,0	8,0	0,0	0,0	0,0
Fumier mou de bovins	3,0	1,1	4,4	56,6	28,7	88,9
<b>Total</b>	<b>54,2</b>	<b>41,7</b>	<b>47,9</b>	<b>70,9</b>	<b>35,1</b>	<b>108,7</b>

Les contributions des 3 types d'élevage volailles, porcs et bovins à la production totale de N maîtrisable est représentée dans la figure 9.



**Figure 9 : Répartition de l'azote maîtrisable en fonction des différents types d'élevage**

La répartition des productions d'azote est assez équilibrée, avec une légère dominance de la production d'azote issue des élevages avicoles. Cependant cette répartition n'est pas aussi équilibrée spatialement puisque les élevages porcins et avicoles se situent dans la partie basse de la zone d'étude alors que les élevages bovins sont répartis sur l'ensemble de la zone.

La production d'éléments non maîtrisables est importante notamment les restitutions directe de  $P_2O_5$  et  $K_2O$ . Un apport régulier d'engrais de ferme sur les prairies permet

d'assurer la couverture des besoins en éléments phosphatés et potassiques. La répartition des déjections étant inégale sur la parcelle, il est nécessaire de s'assurer de l'état de nutrition phosphatée ou potassique de la prairie. Le tableau 12 présente les teneurs moyennes en nutriments des effluents d'élevage rencontrés dans la zone.

**Tableau 12 : Caractéristiques des effluents d'élevages recensés dans la zone d'étude**

Effluents	Quantité d'effluent (t ou m <sup>3</sup> )	Teneurs moyennes en éléments (kg/t ou m <sup>3</sup> )		
		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Litière pintades	48	16,0	13,3	7,5
Litière volailles	756	16,1	15,2	10,2
Fientes de volailles	950	11,3	12,4	10,7
Fumier mou de bovins	884	4,0	1,5	5,9
Lisier dilué de porcs	4250	3,9	2,7	2,6
Lisier pailleux de bovins	4929	3,6	1,9	4,6

### III-2. Surfaces potentiellement épandables

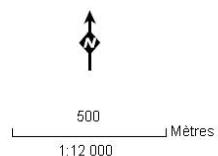
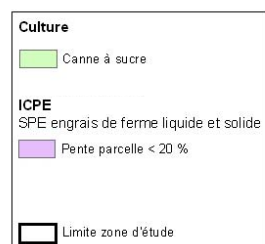
L'application des contraintes réglementaires montre les réductions de surfaces suivantes (tableau 13).

**Tableau 13 : Synthèse des résultats de l'application des distances minimales d'épandage de la réglementation ICPE sur les parcellaires canne à sucre et prairies**

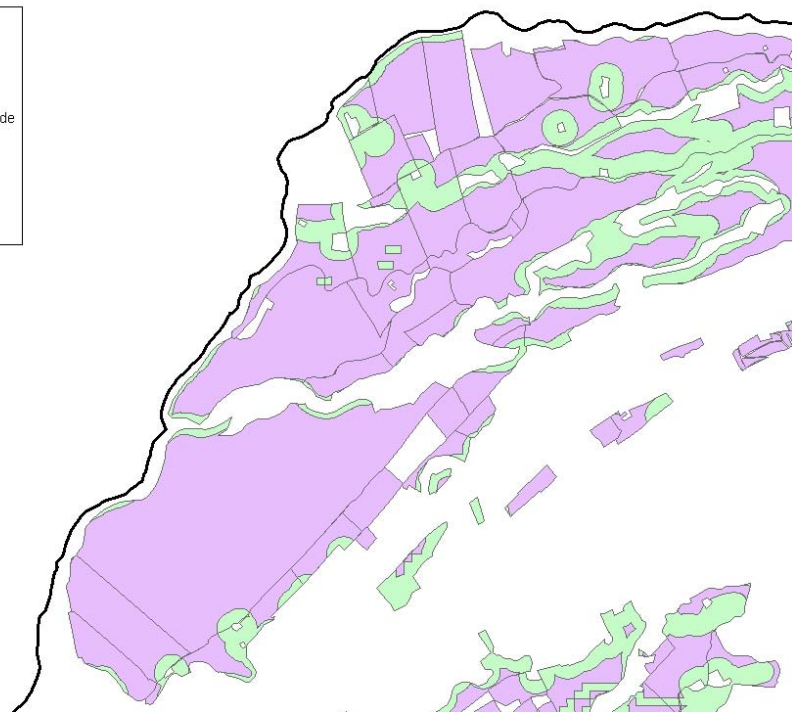
	Limite de pente maximale pour l'épandage	Surface totale (ha)	Surface potentiellement épandable (ha et %)	Surfaces non épandables (ha)
ICPE	15%	1179	545 <b>46%</b>	634
	20%	1179	598 <b>51%</b>	581

Suite à cette opération, le SIG est capable de fournir un besoin en NPK adapté à la nouvelle superficie de la parcelle.

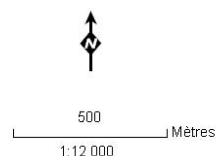
Les figures 10 et 11 illustrent ces surfaces potentiellement épandables.



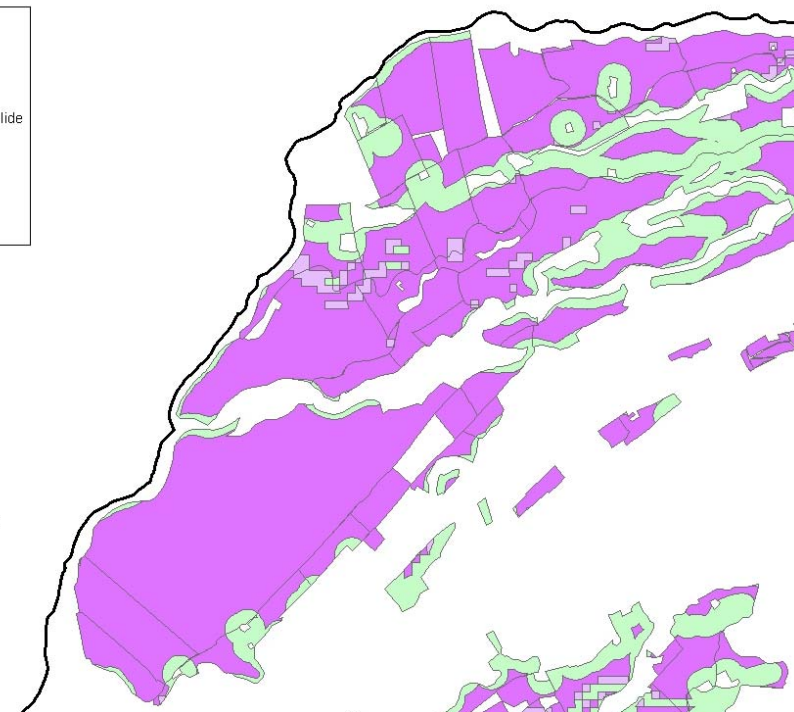
Sources : CIRAD, DAF  
Auteur : CIRAD 2005



(a)



Sources : CIRAD, DAF  
Auteur : CIRAD 2005



(b)

Figure 10 : Surfaces potentiellement épanrables pour les cultures de canne à sucre avec une pente maximale à 20% (a) et avec une pente maximale à 15% (b)

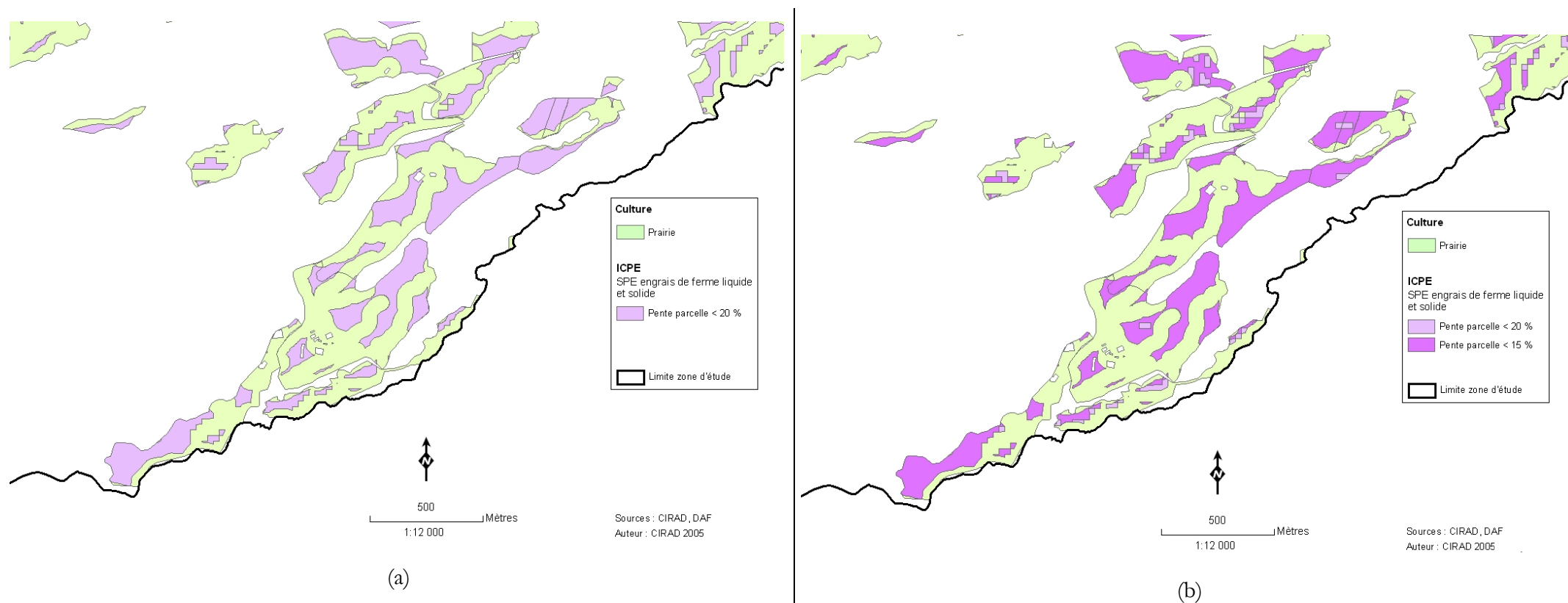


Figure 11 : Surfaces potentiellement épandables pour les prairies avec une pente maximale à 20% (a) et avec une pente maximale à 15% (b)



### III-3. Besoins des cultures

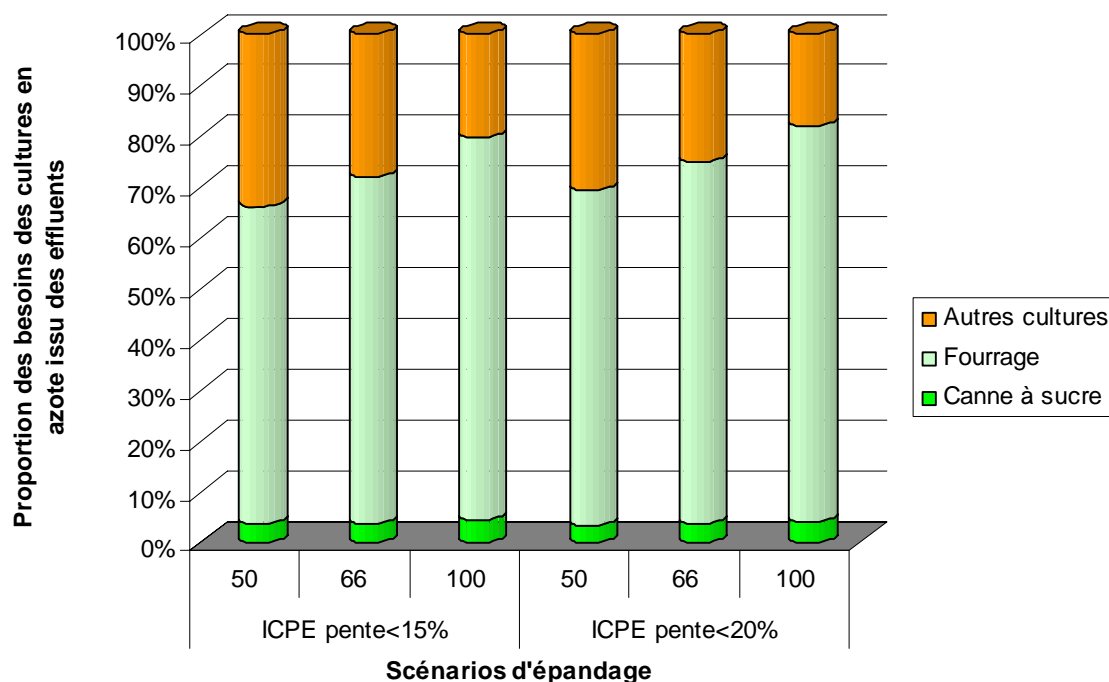
Les besoins en azote apporté par les effluents d'élevage en fonction des scénarios présentés au § II-7-2 sont regroupés dans le tableau 14.

**Tableau 14 : Besoins des cultures en azote apporté par les effluents d'élevage (kgN/an)**

	ICPE pente<15%				ICPE pente<20%			
	Canne à sucre	Fourrage	Autres cultures (1)	Total	Canne à sucre	Fourrage	Autres cultures	Total
100%	4 160	73 401	19 870	97 431	4 431	84 864	19 870	109 165
66%	2 746	48 445		71 061	2 924	56 010		78 804
50%	2 080	36 701		58 651	2 215	42 432		65 517

(1) recouvre les apports en azote pourvus par les amendements organiques et qui représentent respectivement 929 kg pour les cultures d'ananas, 213 kg pour les cultures de fraise, 18 034 kg pour les cultures maraîchères et 694 kg pour les cultures de géranium.

Les proportions des besoins des cultures en azote apporté par les effluents d'élevage sont présentées dans la figure 12.



**Figure 12 : Proportion des besoins en azote issus des effluents d'élevage des 3 grands types de culture du Petit Tampon-Grand Tampon**

Quelque soit le scénario d'épandage retenu, les cultures de canne à sucre et de fourrage, qui représentent plus de 90% de la surface agricole cultivée de la zone, ont un besoin compris entre 60 et 80% de l'azote issu des effluents d'élevage. La demande des cultures de canne à sucre est inférieure à 5% quelque soit le scénario d'épandage. Dans cette zone du Petit Tampon-Grand Tampon, les cultures fourragères constituent un véritable puits de consommation potentielle des effluents d'élevage et en particulier des engrais organiques. Les autres cultures et en particulier le maraîchage constituent un second puits de consommation potentielle de ces effluents (en particulier des amendements organiques).

### III-4. Bilans en effluents d'élevage

Un bilan (offre – demande) négatif dénote un déficit de matière organique pour fertiliser les cultures alors qu'un bilan positif dénote un surplus de matières organiques nécessitant une exportation des effluents bruts ou transformés de la zone excédentaire vers une zone déficitaire. La figure 13 montre l'adéquation entre la production d'effluents d'élevage et les besoins de l'ensemble des cultures de la zone d'étude.

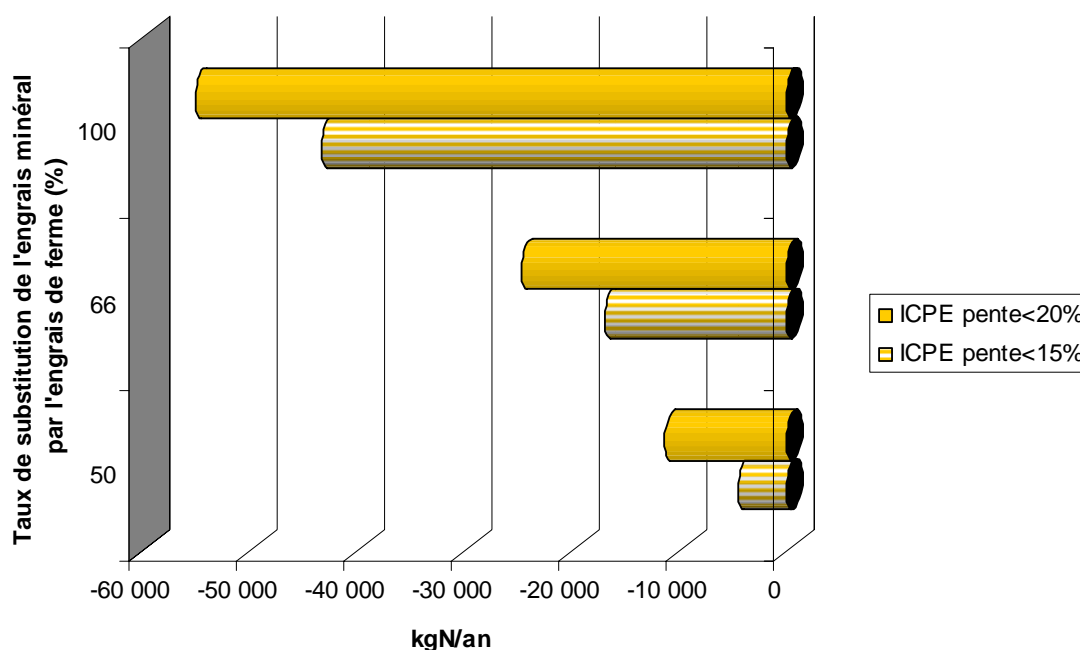
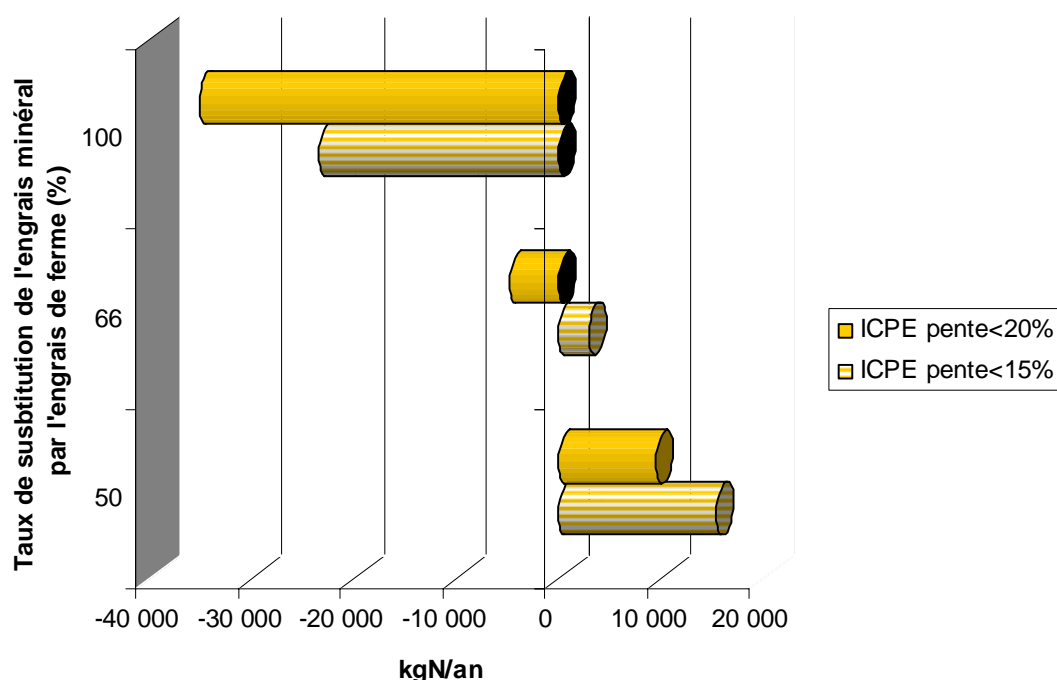


Figure 13 : Bilan entre l'offre en effluents d'élevage et les besoins de l'ensemble des cultures du Petit Tampon-Grand Tampon

On observe que cette adéquation, quelque soit le scénario d'épandage, est négative. Compte tenu des hypothèses fixées (cf. § II-2.), la production d'effluents d'élevage n'est pas suffisante pour satisfaire les besoins des cultures. Notons toutefois que l'équilibre est presque atteint lorsque les cultures reçoivent une fertilisation mixte, 50% engrais de ferme-50% engrais minéraux, sur des surfaces épandables avec une pente inférieure à 15%.

Lorsqu'on ne considère que les besoins des cultures de canne à sucre et de fourrages, ce qui semble plus réaliste puisque les maraîchers, les planteurs d'ananas et de fraise de la zone utilisent de préférence les écumes de sucreries pour amender leurs parcelles, le bilan est plus contrasté en fonction des scénarios d'épandage, et probablement plus juste (figure 14).



**Figure 14 : Bilan entre l'offre en effluents d'élevage et les besoins des cultures de canne à sucre et de fourrage du Petit Tampon-Grand Tampon**

En effet, dans le cas d'une fertilisation des cultures de canne à sucre et de fourrage entièrement organique, on observe toujours un déficit d'effluents d'élevage (en fait d'engrais organiques). En revanche, on s'approche de l'équilibre lorsque l'on réalise une fertilisation mixte des cultures, 66% engrais de ferme-34% engrais minéral.

Diminuer le taux de substitution des engrais minéraux par les engrais de ferme conduit à un excédent d'effluents d'élevage dans la zone.

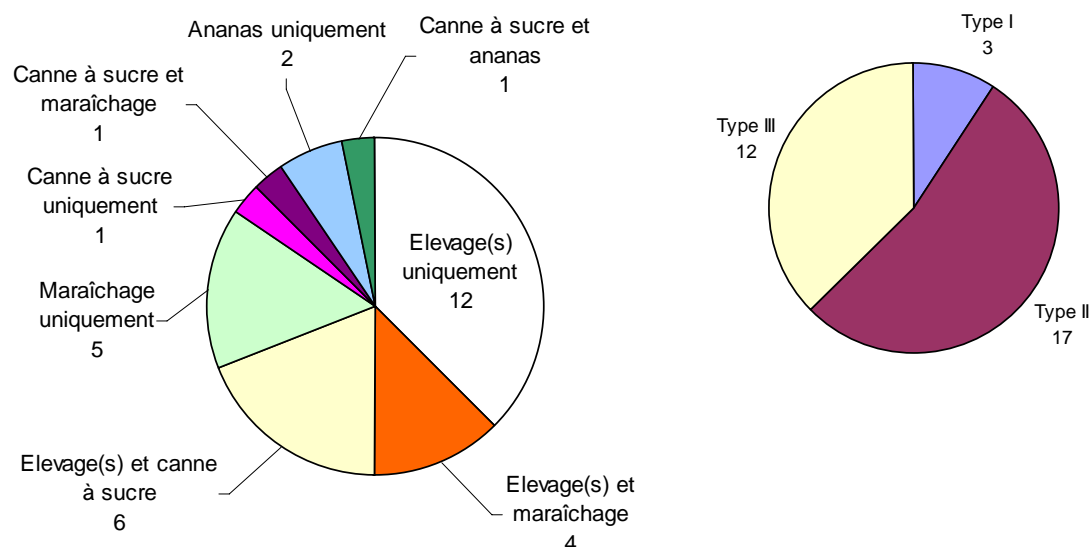
Les cultures de maraîchage, d'ananas, de fraise et de géranium consommant principalement des écumes de sucreries importées, les amendements produits dans la zone et susceptibles d'être valorisés sur ces cultures ne le sont pas. Ainsi la majeure partie des litières de volailles et des fumiers de bovins peuvent représenter un risque de pollution s'ils ne sont pas exportés hors de la zone.

Ces résultats globaux et théoriques, a priori satisfaisants, nous ont conduit à réaliser des « diagnostics » au niveau des exploitations individuelles afin de les (*i.e.* bilans) comprendre au mieux, de déterminer les possibles difficultés de gestion des effluents au niveau de l'exploitation individuelle et, si nécessaire, de concevoir des stratégies de gestion de ces effluents afin de minimiser les risques de pollution dans la zone.

### **III-5. Entretiens avec les agriculteurs en vue de l'utilisation des modèles de simulation**

L'objectif de ces entretiens était de s'informer auprès des agriculteurs sur la gestion des effluents d'élevage qu'ils pratiquent au sein de leurs exploitations. Ces entretiens visaient à favoriser, encourager, l'expression de voir les choses, des conceptions de l'interlocuteur. Emmener l'agriculteur à dire ce qui d'ordinaire va sans dire. Ce mode « dire » nous a permis de laisser le plus d'initiative possible sur les orientations du contenu de la conversation à l'interlocuteur en provoquant des explications, des prolongements sur ce qu'il vient de dire [Darré et al, 2004].

Ainsi, 32 entretiens ont-ils été réalisés dans la zone du Petit Tampon-Grand Tampon (figure 15). Au total 22 éleveurs sur 32 agriculteurs ont été rencontrés.



**Figure 15 : Répartition des entretiens réalisés en fonction des productions et en fonction des grands type de gestion des effluents d'élevage définis par Paillat et al [2003].**

Paillat et al [2003] caractérisent les types suivant l'utilisation des matières organiques et le risque associé à cette utilisation (tableau 15).

**Tableau 15 : Caractéristiques des grands types d'élevage en fonction des pratiques de gestion de leurs effluents**

Type	Utilisation des effluents	Risque
I	1. Epandage des lisiers sur parcelles cultivées, sur friches ou sur canne 2. Epandage des fumiers de volailles sur maraîchage 3. Compostage lisier avec bagasse ou fumier de volailles	1. Débordements des fosses 2. Doses excessives sur toutes les cultures et pratiques d'épandage sauvage
II	1. Epandage des lisiers sur canne, fourrage ou parfois maraîchage 2. Epandage fumier de volailles sur maraîchage	Doses excessives sur parcelles maraîchères
III	Achat (accueil) de matière organique + engrais	Déséquilibre dans la fertilisation

Sur les 32 agriculteurs rencontrés :

- 4 n'ont aucun lien (*i.e.* importation ou exportation de matière organique) avec leurs collègues de la zone ou hors zone
- 12 n'ont aucun lien avec leurs collègues de la zone
- 21 ont un ou plusieurs liens avec des collègues ou des producteurs de matières organiques extérieurs à la zone d'étude
- 18 importent des matières organiques sur leur exploitation dont 14 les importent d'autres zones de production (Entre-Deux, Bérive, Petite-Ile, Saint-Joseph, Plaine des Palmistes). Annuellement, environ 4 800 tonnes de matières organiques brutes sont importées par ces exploitations, dont plus de 2 000 tonnes d'écumes provenant de l'usine sucrière du Gol à Saint-Louis (soit 43% de la masse des matières organiques importées). Le « voyage » d'écume, de 10 à 20 tonnes environ, livré parcelle coûte entre 160 et 250 euros.

- 9 éleveurs exportent tout ou partie de leur production d'effluents, dont 8 exportent une partie de leur production à l'extérieur de la zone. Les entretiens ne permettent pas d'identifier aisément les volumes exportés car les éleveurs ne tiennent pas de comptabilité de ces exportations. Beaucoup expriment des difficultés à exporter leur fumier de bovin ou leur litière de volaille en disant que les maraîchers viennent quand ils peuvent de temps en temps.

Sur les 22 éleveurs rencontrés, 11 parlent de débordement de fosses (souvent fosses non couvertes ou recevant les eaux de drainage) ou ont des difficultés sérieuses d'écoulement de leur production d'effluents.

La synthèse des entretiens réalisés est à finaliser notamment sur les questions relatives à la fertilisation et aux matériels utilisés. Elle nous permettra ensuite le paramétrage des modèles et leur utilisation dès le mois d'octobre 2006. Toutefois, les premiers résultats de ces entretiens montrent que l'hypothèse d'autoconsommation des effluents produits dans la zone est fausse.

Ces entretiens ont aussi révélé l'absence de discussions entre agriculteurs voisins, voire des mésententes, bloquant les transferts d'effluents ; ce qui ne facilitera pas l'élargissement des réseaux d'accointance pour une meilleure répartition de l'utilisation des effluents d'élevage sur la zone.

Le fait pour certains agriculteurs de ne pas vouloir transférer leurs effluents pourrait être interprété comme une forme de compétition entre exploitations. Toutefois, le risque de ne pas pouvoir écouler leurs effluents hors de la zone est important. On aura alors à faire face à des risques de pollution liés à un stockage inadapté ou à une surfertilisation des cultures. Un changement de pratique entre agriculteurs meilleure interaction entre eux pourrait être une voie de progrès importante en terme de gestion de ces effluents. L'utilisation d'outils de gestion de flux des effluents d'élevage nous permettrait de leur montrer cet avantage qui limitera les coûts d'import/export de ces matières fertilisantes.

---

## IV- DISCUSSION

---

En premier lieu, il est important de bien comprendre que ces résultats sont une « photographie théorique » et globale de l'adéquation entre un stock annuel d'effluents d'élevage (sources) et un stock potentiel consommant ces effluents (puits) réalisée sous certaines hypothèses à un instant donné.

Considérer que l'ensemble des surfaces potentiellement épandables sont effectivement épandues est une hypothèse forte qui minimise les résultats du bilan.

La base de données parcellaire est constituée à partir d'informations déclaratives entachées d'imprécisions. En effet, on observe régulièrement sur la représentation cartographique de ce parcellaire des chevauchements de parcelles mais aussi l'absence de certaines parcelles de production fourragères. Compte tenu du travail important de correction et d'amélioration à mettre en place, nous avons conservé l'information de base entraînant inévitablement des imprécisions sur les bilans finaux.

Concernant l'offre en effluents d'élevages, l'utilisation de références Corpen pour leur caractérisation est tout à fait acceptable, mais il aurait été plus pertinent d'utiliser les références moyennes locales éditées par Chabalier et al en 2006.

Le diagnostic des besoins des cultures en fertilisation organique a été établi uniquement en raisonnant la fertilisation sur l'élément azote. Or l'épandage d'effluents d'élevage peut entraîner des déséquilibres dans les apports en éléments fertilisants. On pourrait ainsi aboutir à des excédents en  $P_2O_5$  et des déficits en  $K_2O$ . Il conviendrait donc de raisonner les apports sur plusieurs années et ainsi pouvoir prendre en compte ces acquis ou carences dans la fumure d'entretien suivante. Dans le cas d'une fertilisation mixte, il est important, pour les mêmes raisons, d'adapter la complémentarité minérale le plus précisément possible.

La détermination de la fourniture du sol en éléments nutritifs est possiblement source d'erreur maximisant ainsi la fourniture en nutriments, compte tenu des hypothèses d'élimination de certaines informations analytiques.

Toujours concernant le diagnostic des besoins des cultures en fertilisation organique, les coefficients apparents d'utilisation de l'azote et les coefficients d'équivalence engrais minéral utilisés font partie des éléments centraux dans la détermination des quantités d'effluents valorisables sur la zone d'étude. Leur détermination est délicate [Girard et al, 2005] et c'est pourquoi nous avons choisis des valeurs moyennes sur canne à sucre pour le CAU dans un contexte tropical. Toutefois, les valeurs de CEA retenues sont des valeurs obtenues dans un contexte métropolitain. Par ailleurs, les niveaux de substitution de l'engrais minéral par les effluents d'élevage retenus, l'ont été de manière arbitraire. L'outil développé permet de choisir tous les niveaux possibles de substitution sachant que les agriculteurs, en théorie, souhaitent une fertilisation organique totale de leurs surfaces potentiellement épandables par les effluents qu'ils produisent, mais qu'ils sont limités dans cette pratique pour des raisons de disponibilités, de limite technique du matériel, et par les contraintes climatiques. Les entretiens réalisés auprès des agriculteurs du Petit Tampon-Grand Tampon permettront difficilement de déterminer un taux moyen de substitution compte tenu des informations récoltées.

---

## V- CONCLUSION ET PERSPECTIVES

---

Cette étude, compte tenu des hypothèses retenues, montre un bilan négatif ; ce qui signifie que les productions d'effluents d'élevage ne sont pas en excédent sur la zone. Cette vision globale et théorique est a priori satisfaisante. Mais, elle ne préjuge pas de la réalité à l'échelle des exploitations individuelles. Cependant, elle pourrait encore être précisée notamment au niveau de l'approche agronomique.

Cette vision globale d'un territoire par rapport sa production d'effluents d'élevage pourrait être prospective. Ces scénarios futurs pourraient être aisément envisagés dans la mesure où l'on dispose des évolutions de cheptels et des évolutions des surfaces potentiellement épanchables. Ces informations sont disponibles dans les programmes de développement des filières animales et les prospectives d'étalement de la tâche urbaine (permettant de calculer les surfaces potentiellement épanchables). Des scénarios pourraient être envisagés à l'horizon 2010 et 2015 permettant de projeter, avec toutes les précautions qui s'imposent, les marges de progression possibles en terme de production animale et tester d'autres modes de production des effluents et de pratiques compatibles avec les cultures en place et les surfaces potentiellement épanchables effectivement disponibles.

Moyennant sa validation par les conseillers agricoles notamment, l'outil FertilMO développé dans le cadre de cette étude pourrait être utilisé en routine dans la zone du Petit Tampon-Grand Tampon par les conseillers agricoles pour le conseil en fertilisation mixte raisonnée. L'extension de cet outil à l'ensemble des zones agricoles de la Réunion n'est pour l'instant pas envisagée. Cette méthode que nous avons développée demande du temps et de nombreuses données agronomiques et géographiques pas toujours accessibles. Une des perspectives de ce travail est de simplifier cet outil de diagnostic pour le rendre plus opérationnel et utilisable dans des situations d'expertise.

Parallèlement à ces scénarios spatiaux, il est envisagé de construire des scénarios de gestion dynamique de ces effluents d'élevage, par l'utilisation de modèles de simulation développé au sein de notre équipe et permettant de simuler des transferts de matières organiques entre les ateliers de production et les ateliers de consommation de ces matières au niveau de l'exploitation individuelle et entre exploitations excédentaires et exploitations déficitaires. L'objectif est de minimiser les risques de pollution ponctuelle dans les exploitations d'élevage et de répartir au mieux les matières organiques produites dans une zone où les surfaces potentiellement épanchables semblent suffisantes et les cultures présentes compatibles avec l'épandage.

Ce bilan, par les informations agronomiques qu'il a permis de recueillir et les données sur les pratiques acquises au cours des entretiens, va permettre de paramétrer les modèles de simulation Magma [Guerrin, 2001] et Biomas [Courdier et al, 2002]. Ainsi pourrions-nous tester, en lien avec les acteurs agricoles de la zone, des stratégies efficaces de gestion de leurs effluents à travers l'élargissement de leur réseau d'accointances, la mise en place de stockages intermédiaires, etc.

---

## VI- BIBLIOGRAPHIE

---

**Aubry C., Paillat J.-M., Guerrin F., 2006** – A conceptual representation of animal waste management at the farm scale: The case of the Reunion Island. *Agricultural Systems*, 88 (2-3): 294-315

**Barbet-Massin V., Thomas P., Grimaud P., Michon A., 2004** – Guide technique pour la création, la gestion et la valorisation des prairies à la Réunion. Union des Associations Foncières Pastorales, Cirad Pôle élevage, 99 p.

**Bodet J.-M., Hacala S., Aubert C., Texier C., 2001** – Fertiliser avec les engrais de ferme. Institut de l'élevage, Itavi, ITCF, ITP. Vol. 2, 55 p.

**Chabalier P. F., Renault D., 1998** – Exportations minérales par la canne à sucre sous différents systèmes de culture. Fertilisation raisonnée et application aux apports d'effluents. Rapport Cirad, 14 p.

**Chabalier P. F., Morvan T., Parnaudeau V., Saint Macary H., 2003** – Caractérisation des déchets organiques et des milieux récepteurs (sols andiques) sous climat tropical. Cas de l'île de la Réunion. In Tercé M. (dir.) *Agriculture et épandage de déchets urbains et agro-industriels. Les dossiers de l'environnement de l'Inra*, n°25, Paris, 154 p.

**Chabalier P.-F., Van de Kerchove V., Saint Macary H., 2006** – Guide de la fertilisation organique à la Réunion. Cirad, Chambre d'agriculture de la Réunion. 302 p.

**Corpen, 1996** – Estimation des rejets d'azote par les élevages avicoles. 11 p.

**Corpen 1999** – Estimation des flux d'azote, de phosphore et de potassium associés aux vaches laitières et à leur système fourrager. Influence de l'alimentation et du niveau de production. 18 p.

**Corpen, 2001** – Estimation des flux d'azote, de phosphore et de potassium associés aux bovins allaitants et aux bovins en croissance et à l'engrais, issus des troupeaux allaitants et laitiers et à leur système fourrager. 34 p.

**Corpen, 2003** – Estimation des rejets d'azote, de phosphore, de potassium, de cuivre et de zinc des porcs - Influence de la conduite alimentaire et du mode de logement des animaux sur la nature et la gestion des déjections produites. 41 p.

**Courcier R., Guerrin F., Andriamasinoro F. H., Paillat J.-M., 2002** – Agent-based simulation of complex systems: application to collective management of animal wastes. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation (JASSS)*, 5(3): 27

**Darré J.-P., Mathieu A., Lasseur J., 2004** – Le sens des pratiques. Conceptions d'agriculteurs et modèles d'agronomes. Inra éditions, Sciences Update, 320 p.

**Gerber P., Chilonda P., Franceschini G., Menzi H., 2005** – Geographical determinants and environmental implications of livestock production intensification in Asia. *Bioresource Technology*, 96: 263-276

**Girard M.-C., Walter C., Rémy J.-C., Berthelin J., Morel J.-L., 2005** – Sols et environnement. Cours, exercices et étude de cas. Edition Dunod, collection Sciences sup. 832 p.

**Guerrin F., 2001** – MAGMA: a simulation model to help manage animal wastes at the farm level. *Computers and electronics in agriculture*, 33: 35-54

**Guerrin F., Paillat J.-M. (éditeurs scientifiques), 2003** – Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité – Cas de la gestion des effluents d'élevage à l'île de la Réunion. Restitution des travaux de l'ATP 99/60. Actes du séminaire des 19-20 juin 2002, Montpellier, France. Cirad, Montpellier France, Colloques, Cd-Rom

**Leterme P., 2003** – Valorisation agronomique et évaluation du risque environnemental. In Guerrin F., Paillat J.-M. (éds), *Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité – Cas*



de la gestion des effluents d'élevage à l'île de la Réunion. Actes du séminaire des 19-20 juin 2002, Montpellier, France. Cirad, Colloques, Cd-Rom

**Martinez J., Le Bozec G., 2000** – Déjections porcines et problèmes environnementaux en Europe. Synthèse. Cahiers d'études et de recherches francophones / Agriculture, 9(3) : 181-190

**Médoc J.M., Raimbault T., Ayache B. 2006** – Assessment of the balance between livestock effluent production and nutrient demand by crops in a small agricultural area of the Reunion Island. 12th Ramiran international conference on Technology for recycling of manure and organic residues in a whole-farm perspective. Aarhus, Denmark 2006/09/11-14, Dias Report #123(2) : 65-67 and poster

**NG Kee Kwong K. F., Deville J., 1992** – Nitrogen fertilizer use by sugarcane ratoon crops in Mauritius. ISSCT Proc. 21 Congres, Bangkok, Thailand. Vol. 2 :42-55

**Paillat J.M., Aubry C., Médoc J.M., 2003** – Une typologie des systèmes de gestion des effluents d'élevage dans les exploitations de l'île de la Réunion. In Guerrin F., Paillat J.-M., (éds) Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité. Cas de la gestion des effluents d'élevage à l'île de la Réunion. Actes du séminaire des 19-20 juin 2002, Montpellier, France. Cirad, Colloques, Cd-Rom

**Pouzet D., Chabalier P.-F., Légier P., 1998** – Fertilité des sols et conseil en fertilisation. Système expert d'interprétation des analyses chimiques des sols réunionnais. Documents de travail du Cirad-Ca, #1-98, 98 p.

**Raimbault T., 2005** – Adéquation actuelle entre l'offre en effluents d'élevage et les besoins des cultures sur le territoire Petit-Grand Tampon à La Réunion. Rennes, France: Agrocampus Rennes, Université de Rennes1, 44 p. Rapport de stage (Master Professionnel : Sciences et Productions Végétales).

**Roy R. N., Misra R. V., Lesschen J. P., Smaling E. M., 2005** – Evaluation du bilan en éléments nutritifs du sol. Approches et méthodologies. Bulletin FAO engrais et nutrition végétale 14, 85 p.

**Sacco D., Bassanino M., Grignani C., 2003** – Developing a regional agronomic information system for estimating nutrient balances at a larger scale. European Journal of Agronomy, 20:199-210

**Saint Macary H., Médoc J.M., Chabalier P., 2003** – Systèmes de culture de la Réunion. Typologie, spatialisation et éléments pour un référentiel. In Guerrin F., Paillat J.-M., (éds.), Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité. Cas de la gestion des effluents d'élevage à l'île de la Réunion. Actes du séminaire des 19-20 juin 2002, Montpellier, France. Cirad, Colloques, Cd-Rom

**Smaling E. M. A., Fresco L. O., 1993** – A decision-support model for monitoring nutrient balances under agricultural land use (NUTMON). Geoderma, 60(1-4): 235-256

**Stoorvogel J. J., Smaling E. M. A., 1990** – Assessment of soil nutrient depletion in sub-Saharan Africa: 1983-2000. Report #28. Wageningen, The Netherlands, Winand Staring Centre.

## VII- LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation de la zone d'étude Petit Tampon-Grand Tampon.....	7
Figure 2 : Carte générale de la zone du Petit Tampon-Grand Tampon et répartition des cultures .....	8
Figure 3 : Démarche mise en œuvre .....	11
Figure 4 : Répartition des exploitations d'élevage de la zone sur l'orthophoto aérienne du Petit Tampon et Grand Tampon (source BD Topo, 2005) .....	12
Figure 5 : Principe illustré du bilan prévisionnel visant à équilibrer les deux plateaux de la balance en estimant chaque poste .....	16
Figure 6 : Fourniture du sol en $N_{min}$ , $P_2O_5$ et $K_2O$ (kg/ha) calculée par interpolation IDW .....	21
Figure 7 : Schéma de principe de l'outil informatique de calcul spatialisé des besoins des cultures en engrais de ferme et de calcul de l'adéquation entre l'offre en effluents d'élevage et les besoins des cultures dans une zone considérée.....	26
Figure 8 : Formulaire de requête permettant de calculer le besoin en effluent d'élevage d'une parcelle ou d'un groupe de parcelles .....	28
Figure 9 : Répartition de l'azote maîtrisable en fonction des différents types d'élevage....	29
Figure 10 : Surfaces potentiellement épandables pour les cultures de canne à sucre avec une pente maximale à 20% (a) et avec une pente maximale à 15% (b) .....	31
Figure 11 : Surfaces potentiellement épandables pour les prairies avec une pente maximale à 20% (a) et avec une pente maximale à 15% (b).....	32
Figure 12 : Proportion des besoins en azote issus des effluents d'élevage des 3 grands types de culture du Petit Tampon-Grand Tampon .....	33
Figure 13 : Bilan entre l'offre en effluents d'élevage et les besoins de l'ensemble des cultures du Petit Tampon-Grand Tampon .....	34
Figure 14 : Bilan entre l'offre en effluents d'élevage et les besoins des cultures de canne à sucre et de fourrage du Petit Tampon-Grand Tampon .....	35
Figure 15 : Répartition des entretiens réalisés en fonction des productions et en fonction des grands type de gestion des effluents d'élevage définis par Paillat et al [2003]. ....	36

---

## VIII- LISTE DES TABLEAUX

---

Tableau 1 : Surfaces des cultures de la zone d'étude [DDAF, Chambre d'Agriculture].....	9
Tableau 2 : Paramètres pour l'estimation des rejets de N, P et K par les élevages de porcs .....	13
Tableau 3 : Paramètres pour l'estimation des rejets de N, P et K par les élevages de volailles .....	14
Tableau 4 : Paramètres pour l'estimation des rejets de N, P et K par les élevages bovins laitiers, allaitants et à l'engrais pour un animal.....	14
Tableau 5 : Classement des effluents d'élevages produits dans la zone d'étude en fonction de leurs action sur la culture ou sur le sol .....	15
Tableau 6 : Caractéristiques des grands types de sols réunionnais [Pouzet et al, 1998] .....	19
Tableau 7 : Seuils d'interprétation des analyses de sol.....	19
Tableau 8 : Coefficients d'équivalence engrais minéral (CEA) utilisés dans cette étude [Bodet et al, 2001] .....	23
Tableau 9 : Distances minimales d'épandage relatives à la réglementation ICPE.....	25
Tableau 10 : Options possibles pour la construction des scénarios de calcul des besoins des cultures en fertilisation .....	27
Tableau 11 : Production totale de N, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> et K <sub>2</sub> O issue des différents effluents d'élevages produits au Petit-Grand Tampon.....	29
Tableau 12 : Caractéristiques des effluents d'élevages recensés dans la zone d'étude.....	30
Tableau 13 : Synthèse des résultats de l'application des distances minimales d'épandage de la réglementation ICPE sur les parcellaires canne à sucre et prairies.....	30
Tableau 14 : Besoins des cultures en azote apporté par les effluents d'élevage (kgN/an). 33	
Tableau 15 : Caractéristiques des grands types d'élevage en fonction des pratiques de gestion de leurs effluents .....	36

## IX- ANNEXES

### IX-1. Méthode d'interpolation Inverse Distance Weighting (IDW)

Taille de la cellule

Définit la largeur et la hauteur d'une cellule de grille dans des unités de distance.

Dimensions de la grille

Contrôle statique affichant les dimensions de la grille.

Facteur d'influence

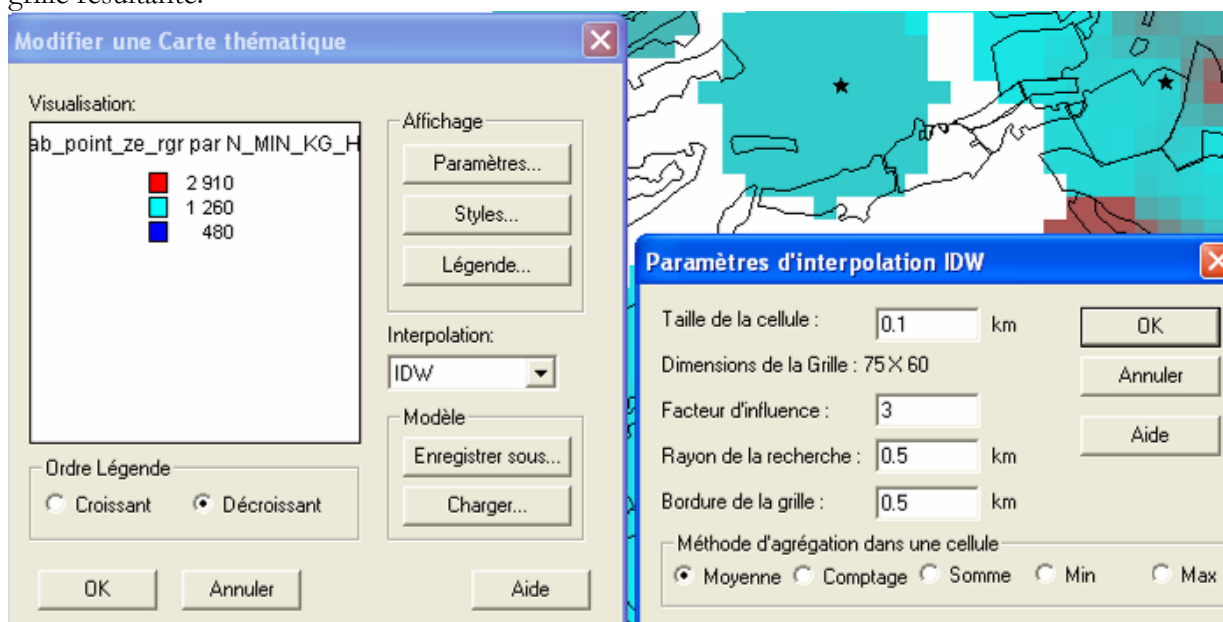
Définit l'influence exponentielle des points de données proches sur la valeur calculée pour chaque cellule de grille. L'augmentation de l'exposant réduit l'influence des points de données d'autant plus qu'ils appartiennent à une cellule de grille.

Rayon de la recherche

Définit la distance maximale entre une cellule de grille et ses points de données environnants. La distance détermine si ces points sont considérés dans la moyenne de pondération de distance.

Bordure de la grille

Définit la distance au-delà du rectangle englobant de la table source par lequel étendre la grille résultante.



### IX-2. Estimation des rejets des élevages de porcs de la zone du Petit Tampon-Grand Tampon

ID	Type d'animaux	Logement	Alimentation	Q <sub>TNE</sub> + 25%	Type d'effluent	Quantité d'effluent (t ou m <sup>3</sup> /an)	Quantité d'éléments maîtrisables (t/an)		
							N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
P1	TNE	Caillebotis intégral	Standard	56,25	Lisier dilué	1 125	4,4	3,1	3,0
P2	TNE	Caillebotis intégral	Standard	50	Lisier dilué	1 000	3,9	2,7	2,7
P3	TNE	Caillebotis intégral	Standard	56,25	Lisier dilué	1 125	4,4	3,1	3,0
P4	TNE	Caillebotis intégral	Standard	50	Lisier dilué	1 000	3,9	2,7	2,7
<b>Total</b>						<b>4 250</b>	<b>16,5</b>	<b>11,6</b>	<b>11,4</b>

### IX-3. Estimation des rejets des élevages de volailles de la zone du Petit Tampon-Grand Tampon

ID	Type d'animaux	Mode de logement	Nombre d'animaux	Type d'effluent	Quantité d'effluent (t/an)	Quantité d'éléments maîtrisables (t/an)		
						N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
V1	Pintades	Litière seule (sans parcours)	12 800	Litière pintade	48	0,8	0,6	0,4
V2	Poulet de chair	Litière seule (sans parcours)	45 900	Litière volaille	90	1,4	1,4	0,9
V3	Poulet de chair	Litière seule (sans parcours)	56 610	Litière volaille	111	1,8	1,7	1,1
V4	Poulet de chair	Litière seule (sans parcours)	30 600	Litière volaille	60	1,0	0,9	0,6
V5	Poulet de chair	Litière seule (sans parcours)	30 600	Litière volaille	60	1,0	0,9	0,6
V5 bis	Poulet de chair	Litière seule (sans parcours)	30 600	Litière volaille	60	1,0	0,9	0,6
V7	Poulet de chair	Litière seule (sans parcours)	33 600	Litière volaille	66	1,1	1,0	0,7
V1 bis	Poulet de chair	Litière seule (sans parcours)	39 780	Litière volaille	78	1,3	1,2	0,8
V8	Poulet de chair	Litière seule (sans parcours)	45 900	Litière volaille	90	1,4	1,4	0,9
V9	Poulet de chair	Litière seule (sans parcours)	53 550	Litière volaille	105	1,7	1,6	1,1
V10	Poules pondeuses	Cages collectives, évacuation tapis-plate forme	20 000	Fientes de volailles	800	9,0	10,0	8,0
<b>Total</b>					<b>1 568</b>	<b>21,3</b>	<b>21,6</b>	<b>15,7</b>

### IX-4. Estimation des rejets des élevages bovins laitiers de la zone du Petit Tampon-Grand Tampon

ID	Type d'animaux	Mode de logement	Effectif moyen	Durée de présence pendant l'année (mois)	Type d'effluent	Quantité d'effluent (t ou m³ /an)	Quantité d'éléments maîtrisable (t/an)		
				Durée de présence dans le bâtiment (h/jour)			N	P₂O₅	K₂O
B1	VL6	Caillebotis intégral	33	12 6	Lisier	356,0	0,7	0,3	1,0
B11	G0	Aire de couchage paillée	10	12	Fumier mou	63,0	0,8	0,3	1,1
	G1		12	12		128,0			
B2	VL6	Caillebotis intégral	27	12 6	Lisier	292,0	0,6	0,3	0,8
B21	G0	Aire de couchage paillée	10	12	Fumier mou	63,0	0,9	0,3	1,3
	G1		12	12		126,0			
	G2		2			27,0			
B3	VL6	Caillebotis intégral	35	12 6	Lisier	378,0	0,7	0,3	1,0
B31	G0	Aire de couchage paillée	6	12 12	Fumier très mou	44,0	0,2	0,0	0,2
B4	VL6	Caillebotis intégral	32	12 8	Lisier	461,0	0,9	0,4	1,3
B41	G0	Aire de couchage paillée	8	12	Fumier mou	50,0	0,7	0,3	1,0
	G1		7	12		73,0			
	G2		3			40,0			
B5	VL6	Caillebotis intégral	35	12 4	Lisier	252,0	0,5	0,2	0,7
B51	G0	Aire de couchage paillée	6	12	Fumier mou	12,0	0,2	0,1	0,3
	G1		20	4		68,0			
	G2		5			21,0			
B6	VL6	Caillebotis intégral	62	12 6	Lisier	670,0	1,3	0,6	1,8
B61	G0	Aire de couchage paillée	12	12	Fumier mou	50,0	0,3	0,1	0,5
	G1		12	8		84,0			
	G2		4			35,0			
					Total lisier	2409,0	4,7	2,1	6,6
					Total fumier	884,0	3,0	1,1	4,4
Total							7,7	7,7	3,3

### IX-5. Estimation des rejets des élevages bovins à l'engrais de la zone du Petit Tampon-Grand Tampon

ID	Type d'animaux	Mode de logement	Effectif moyen	Durée de présence pendant l'année (mois)	Type d'effluent	Quantité d'effluent (m <sup>3</sup> )	Quantité d'éléments maîtrisable (t)		
				Durée de présence dans le bâtiment (h/jour)			N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
BE1	BV1	Caillebotis intégral	40	12 12	Lisier	480,0	1,6	1,0	1,8
BE2	BV1	Caillebotis intégral	12	12 12	Lisier	144,0	0,5	0,3	0,6
BE3	BV1	Caillebotis intégral	16	12 12	Lisier	192,0	0,6	0,4	0,7
BE4	BV1	Caillebotis intégral	30	12 12	Lisier	360,0	1,2	0,8	1,4
BE5	BV1-5	Caillebotis intégral	10	12 12	Lisier	96,0	0,4	0,2	0,5
BE6	BV1	Caillebotis intégral	15	12 12	Lisier	180,0	0,6	0,4	0,7
BE7	BV1	Caillebotis intégral	40	12 12	Lisier	480,0	1,6	1,0	1,8
BE11	BV1	Caillebotis intégral	49	12 12	Lisier	588,0	2,0	1,2	2,3
<b>Total</b>							<b>8,5</b>	<b>5,3</b>	<b>9,8</b>

Onze élevages de bovins allaitants et 3 élevages de bovins à l'engrais représentant 718 UGB s'ajoutent aux élevages ci-dessus. Les déjections de ces animaux ne sont pas maîtrisables puisqu'ils passent la totalité de leur temps aux pâturages.